

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

**Návrh úprav kotle K3 v Teplárně Olomouc pro snížení emisí
NO_x**

**Propose Modifications to the Boiler K3 in Teplárna Olomouc
to Reduce NO_x Emissions**

Student:

Bc. Petr Dvořák

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Dvořák**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **2302T006 Energetické stroje a zařízení**
Téma: **Návrh úprav kotle K3 v Teplárně Olomouc pro snížení emisí NO_x**
Propose Modifications to the Boiler K3 in Teplárna Olomouc to Reduce NO_x Emissions

Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh úprav kotle K3 v Teplárně Olomouc pro snížení emisí NO_x a CO.

Diplomová práce bude obsahovat: Popis stávajících možných metod možnosti snížení emisí NO_x primárními metodami; Základní bilanční výpočty množství spalín a paliva; Návrh a výpočet zařízení pro přívod dohořivacích vzduchů; Návrh úprav přívodů dohořivacích vzduchů; Měření rychlostního pole v oblasti přívodů dohořivacích vzduchů; Návrh optimalizace spalovacího režimu kotle K3.
Grafické část práce bude obsahovat: Výkres kotle K3 s návrhem umístění dohořivacích vzduchů; Výkresovou dokumentaci úprav přívodů dohořivacích vzduchů.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Černý, V. a kol. Parní kotle a spalovací zařízení, SNTL Praha 1975.
- [2] Kolat, P. Přenos tepla a hmoty, skripta VŠB Ostrava 1987.
- [3] ON 074017 Tepelný výpočet parních kotlů.
- [4] Dlouhý, T. Výpočty kotlů a spalínových výměníků, skripta ČVUT Praha 2005.
- [5] Podklady a materiály katedry energetiky pro primární opatření denitrifikace.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

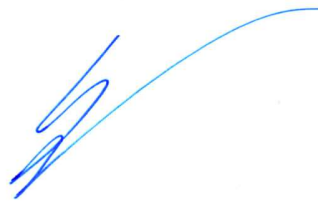
Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 13.12.2014
Datum odevzdání: 18.05.2015





prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry

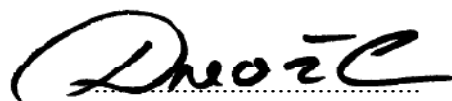


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Suchonicích 17.5.2015

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Dvořák', written over a dotted horizontal line.

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladu, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.



V Suchonicích : 17.5.2015

Petr Dvořák

Adresa trvalého pobytu autora práce:

plné jméno autora práce

Suchonice 60, 783 57

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Dr. Ing. Bohumíru Čechovi za odborné vedení, ochotu, cenné rady, připomínky a předání mnohých zkušeností při vedení mé diplomové práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

DVOŘÁK, P. *Návrh úprav kotle K3 v Teplárně Olomouc pro snížení emisí NO_x*. Ostrava, 2015. 60 s. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky. Vedoucí práce: Čech, B.

Předkládaná diplomová práce popisuje vznik emisí NO_x jejich dopady a opatření vedoucí ke snížení produkce NO_x. Pro snížení emisí NO_x na kotli K3 provozovaném v Teplárně Olomouc je uveden návrh úprav systému dohořívacích vzduchů OFA. Úpravy systému se týkají především použití posilovacího ventilátoru, nových vzduchových kanálů a vstupních dýšen. Součástí práce je i měření koncentrací plynů NO_x, CO, O₂ a teplotního pole ve spalovací komoře kotle K3.

Klíčová slova: kotel K3, OFA, emise NO_x, Teplárna Olomouc

ANNOTATION OF MASTER THESIS

DVOŘÁK, P. *Propose Modification to the Boiler K3 in Teplárna Olomouc to Reduce NO_x Emissions*. Ostrava, 2015. 60 s. Master Thesis. VŠB-TU Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, The Department of Power Engineering. Thesis head: Čech, B.

This submitted thesis describes the formation of NO_x emission their impact and measure to reduce NO_x production. To reduce NO_x emissions from the boiler K3 operated in Olomouc Heat is given suggestion system adjustments afterburner airs OFA. System modifications concern mainly to the use of booster fan, new air ducts and inlet nozzles. The work also includes measurements of gas concentrations of NO_x, CO, O₂ and temperature field in the combustion chamber of the boiler K3.

Key words: boiler K3, OFA, emission NO_x, Teplárna Olomouc

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	5
ÚVOD	10
1. Emise oxidů dusíku	12
1.1 Obecný problém emisí NO _x	12
1.2 Základní charakteristika	13
1.3 Mechanismy vzniku emisí při spalování	13
1.3.1 Palivové NO _x	14
1.3.2 Promptní NO _x	15
1.3.3 Vysokoteplotní NO _x	15
1.4 Dopad na životní prostředí.....	16
1.5 Dopady na lidský organismus.....	17
2. Vliv konstrukce kotle na emise NO_x	17
2.1 Typ ohniště	17
2.2 Umístěním hořáků	18
2.3 Druhy hořáků na spalování uhlého prášku.....	18
2.3.1 Proudové hořáky	18
2.3.2 Vířivé hořáky	19
3. Způsoby snižování emisí NO_x.....	19
3.1 BAT	20
3.2 BREF	20
3.3 Primární opatření	20
3.3.1 První generace.....	20
3.3.2 Druhá generace.....	23
3.3.3 Třetí generace.....	24
3.3.4 Opatření vedoucí ke snížení emisí NO _x na kotli K3.....	25
3.3.5 Provozní požadavky primárních opatření.....	28
3.4 Sekundární opatření.....	29
3.4.1 Metoda SCR.....	29
3.4.2 Požadavky na katalyzátor.....	32
3.4.3 Materiály katalyzátorů.....	33
3.4.4 Otrava katalyzátorů	33
3.4.5 Úsady a eroze	33
3.4.6 Životnost katalyzátorů.....	33

3.5	Metoda SNCR	34
4.	Základní informace o Teplárně Olomouc.....	35
4.1	Technický popis a základní parametry kotle K3.....	36
5.	Stávající systém dohořívacích vzduchů a jeho účinnost.....	38
5.1	Popis stávajícího systému	38
5.2	Měření teplot a koncentrací plynů na kotli K3	39
5.2.1	Měření teploty	39
5.2.2	Měření koncentrace plyných složek spalín CO , NO_x , O_2	40
5.3	Vyhodnocení naměřených hodnot	41
5.3.1	Vyhodnocení teplotního pole	41
5.3.2	Vyhodnocení naměřených koncentrací	43
6.	Návrh nového systému dohořívacích vzduchů	47
6.1	Prvkové složení paliva.....	47
6.2	Stechiometrické výpočty	49
6.2.1	Stanovení stechiometrického množství vzduchu a spalín	49
6.2.2	Hustota vzduchu a spalín.....	50
6.2.3	Entalpie vzduchu a spalín.....	51
6.3	Tepelná bilance kotle.....	51
6.3.1	Redukovaná výhřevnost	51
6.3.2	Ztráty kotle	53
6.3.3	Účinnost kotle	55
6.4	Výrobní teplo a množství paliva při maximálním a minimálním výkonu kotle	55
6.5	Výpočet množství vzduchu pro maximální a minimální výkon a odhad potřeby OFA vzduchu.....	56
6.5.1	Hrubá vzduchová bilance	57
6.6	Návrh ventilátoru.....	57
6.7	Konstrukční návrh úprav systému dohořívání vzduchu.....	58
6.7.1	Úprava systému.....	59
6.8	Ověření návrhu, výpočet tlakové ztráty rozvodu vzduchu	59
6.9	Délková roztažnost potrubí.....	67
6.9.1	Výpočet délkové roztažnosti jednotlivých částí kanálu.....	67
6.10	Izolace potrubí	68
6.11	Odhad nákladů.....	68
	ZÁVĚR.....	69
	LITERATURA	70

Seznam příloh	72
----------------------------	-----------

Seznam použitých značek a symbolů

a,b	rozměry kanálu	[mm]
A	popelovina	[%]
Ar	argon	[%]
As	astat	[%]
c_{pv}	měrná tepelná kapacita paliva	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
c_{su}	měrná tepelná kapacita sušiny	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
CO	oxid dusný	[%], [ppm]
CO(NH ₂) ₂	močovina	[%], [ppm]
CH _i	uhlovodík	[%]
d_{ekv}	ekvivalentní průměr	[m ²]
I	entalpie vztažená k 1 kg paliva	[kJ.kg ⁻¹]
i'	měrná entalpie složek	[kJ.Nm ⁻³]
i_{pv}	entalpie (fyzické teplo) paliva	[kJ.kg ⁻¹]
i_{pp}	entalpie ostré páry	[kJ.kg ⁻¹]
i_{nv}	entalpie napájecí vody	[kJ.kg ⁻¹]
i_v	entalpie vstřikovací vody	[kJ.kg ⁻¹]
i_w	entalpie odluhu	[kJ.kg ⁻¹]
h	hořlavina	[%]
H	vodík	[%], [ppm]
H ₂ O	voda	[%]
HCN	kyanovodík	[%]
HNO ₂	kyselina dusitá	[%]
HNO ₃	kyselina dusičná	[%]
L	délka	[m]
M_{pal}	množství paliva	[kg.s ⁻¹]
M_{pv}	výpočtové množství paliva	[kg.s ⁻¹]
M_{pp}	průtok ostré páry	[kg.s ⁻¹]
M_v	průtok vstřikovací vody	[kg.s ⁻¹]
M_o	množství odluhu	[kg.s ⁻¹]
N ₂	dusík	[%], [ppm]

NH ₃	amoniak	[%], [ppm]
NO	oxid dusnatý	[%], [ppm]
NO ₂	oxid dusičitý	[%], [ppm]
N ₂ O	oxid dusný	[%], [ppm]
N ₂ O ₃	oxid dusitý	[%], [ppm]
N ₂ O ₄	tetraoxid dusíku	[%], [ppm]
NO _x	oxidy dusíku	[%], [ppm]
NKP-P	nejvyšší přípustná koncentrace	[mg.m ⁻³]
O ₂	kyslík	[%], [ppm]
O ₃	ozón	[%], [ppm]
O _{VZ}	vzduch pro spalování	[Nm ³ . s ⁻¹ , Nm ³ . h ⁻¹]
O ⁿ _{OFA}	vzduch OFA	[Nm ³ . s ⁻¹ , Nm ³ . h ⁻¹]
O _{OFA}	vzduch OFA skutečný	[m ³ . s ⁻¹]
PEL	přípustný expoziční limit	[mg.m ⁻³]
p _s	tlak spalin	[Pa]
p _o	tlak, přetlak vzduchu za ventilátorem	[Pa, MPa]
p _{o1}	tlak, přetlak vzduchu před ventilátorem	[Pa, MPa]
p _s	hodnota statického tlaku	[Pa]
p _{s1}	hodnota celkového tlaku	[Pa]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
Q _i	výhřevnost	[MJ.kg ⁻¹ , kJ.kg ⁻¹]
Q _s	spalné teplo	[MJ.kg ⁻¹ , kJ.kg ⁻¹]
Q _{vyr}	tepelný výkon dílčí	[MW]
Q _{vyr,j}	tepelný výkon jmenovitý	[MW]
Q _v	výrobní teplo	[kJ.s ⁻¹]
S	síra	[%]
S	průřez	[m ²]
SO ₂	oxid siřičitý	[%], [ppm]
SO ₃	oxid sírový	[%], [ppm]
T	termodynamická teplota	[K]
t	teplota	[°C]

t_s	teplota spalin	[°C]
V	prchavá hořlavina	[%]
V	objem	[Nm ³ .kg ⁻¹]
W	voda	[%]
w	rychlost proudění v kanále	[m.s ⁻¹]
w_u	rychlost vzduchu na výstupu z dýšny v kotli	[m.s ⁻¹]
Z_{cc}	ztráty mechanickým nedopalem	[%]
Z_{ci}	ztráty mechanickým popelem	[%]
Z_{cu}	ztráty mechanickým struskou	[%]
Z_{CO}	ztráty chemickým nedopalem	[%]
Z_k	ztráty citelným teplem spalin	[%]
Z_f	ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků	[%]
Z_{sv}	ztráty sáláním	[%]
α	přebytek vzduchu	[-]
α	součinitel délkové roztažnosti	[K ⁻¹]
β	součinitel	[-]
Δp	tlaková ztráta	[Pa]
Δt	rozdíl teplot	[°C, K]
ε	ekvivalentní drsnost stěn	[mm]
λ	součinitel třecích ztrát	[-]
ω_{RO2max}	poměr objemů tříatomových plynů	[%]
ρ	hustota	[kg.m ⁻³]
χ_v	součinitel pro korekci vlhkosti vzduchu	[-]
ν	kinematický viskozita	[m ² .s ⁻¹]
η	účinnost	[%]
ξ	součinitel místních ztrát	[-]
BAT	Best Available Techniques	
BREF	BAT Reference Documents	
CFD	Computational Fluid Dynamics	

EKO	ohřívák vody
EMG Liberec	Energomontáže Liberec
EO	elektrostatický odlučovač
EU	Evropská unie
K1,2,3, 4, 5	kotel
LTO	lehký topný olej
LUWO	ohřívák vzduchu
MO	mechanický odlučovač
OFA	dohořivací vzduch
OKD	Ostravsko-karvinské doly
ROFA	Rotating Opposed Fire Air
ROTAMIX	
SCR	Selective Catalytic Reduction
SNCR	Selective non-Catalytic Reduction
TG3, 4	turbogenerátor
VŠB-TUO	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Index dolní

H ₂ O	vodní pára
O ₂ , min	minimální objem kyslíku
red	redukovaný
SS, min	minimální suché spaliny
SV, min	minimální vlhké spaliny
SV	vlhké spaliny
VS, min	minimální suchý vzduch
VV,min	minimální vlhký vzduch
VV	vlhký vzduch

Index horní

a	analytický
d	bezvodý

r	hrubý
h	hořlavina
daf	hořlavina
t	teplota
tS, pS	provozní teplota a tlak
S	spaliny
V	vzduch

ÚVOD

Tématem diplomové práce je návrh úprav kotle K3 v Teplárně Olomouc pro snížení emisí NO_x . Nová SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích předepisuje pro Teplárnu Olomouc nové emisní limity. Jedná se zejména o emise NO_x a CO na úrovni 200 mg.Nm^{-3} . V integrovaném povolení má nyní kotel K3 předepsány emisní limity pro emise NO_x na úrovni 650 mg.Nm^{-3} a emise CO na úrovni 100 mg.Nm^{-3} . Průměrné koncentrace NO_x se v roce 2013 pohybovaly podle záznamů z kontinuálního měření emisí na hodnotě $517,86 \text{ mg.Nm}^{-3}$ a průměrné emise CO na úrovni $35,06 \text{ mg.Nm}^{-3}$. Kotel je nejčastěji provozován na výkonové hladině 55 t.h^{-1} .

Teplárna jako zdroj je zařazena podle zákona č. 201/2012 Sb. do Přechodného národního plánu a tudíž nebude muset od 1.1.2016 plnit nové emisní limity a to až do 30.6.2020. V tomto období však bude muset postupně snižovat produkci emisí podle legislativně stanovených pravidel až na úroveň nově platných emisních limitů.

Měření konaná na kotli K3 prokázala, že je možné snížit emise NO_x na úroveň 390 a 400 mg.Nm^{-3} při plnění emisního limitu CO. V roce 2012 proběhlo měření teplotních polí v prostoru pod šoty, které pro různé provozní stavy potvrdilo existenci teplotního pole pro aplikaci technologie SNCR. Na toto měření navázala v lednu 2013 zkouška technologie SNCR, která ukázala, že pro dané konstrukční řešení kotle lze snížit emise NO_x pod 200 mg.Nm^{-3} . Rovněž byl kotel testován pro provoz s nižšími přebytky vzduchu. Realizované zkoušky snižování přebytků vzduchu, zkoušky technologie SNCR ukázaly, že dalšího zlepšení by bylo možné dosáhnout rekonstrukcí systému dohořivacích vzduchů a to s ohledem na skutečnost, že při snížení emisí NO_x na hodnotu 350 mg.Nm^{-3} dochází při jakékoliv poruše v regulaci tlaku páry nebo teploty páry k prudkému zlomu v emisích CO, kdy z hodnoty 80 mg.Nm^{-3} vystupují tyto koncentrace na úroveň $1000 - 1200 \text{ mg.Nm}^{-3}$.

Podobnou situaci s emisemi se na zařízeních v Polsku rozhodli řešit instalací systémů ROFA společnosti Nalco Mobotec. Na těchto aplikacích je právě klasický systém dohořivacích vzduchů „vylepšen“ s ohledem na větší vykrytí průřezu spalovací komory o posilovací ventilátory vzduchu. Tato aplikace dále zvyšuje účinnost primárních metod před aplikací sekundárních metod.

S ohledem na výše uvedené jsem si jako užší zaměření diplomové práce vybral rekonstrukci dohořivacích vzduchů práškového granulačního kotle K3 jako součást primárních opatření.

Smyslem práce je hlouběji analyzovat způsob možných úprav systému dohořivacích vzduchů kotle K3 jako jednu část primárních opatření.

Cílem práce je:

- analyzovat účinnost stávajícího systému dohořivacích vzduchů
- ověřit opakovaně podmínky pro návrh technologie SNCR
- navrhnout úpravu dýšen dohořivacích vzduchů
- navrhnout ve spolupráci s výrobcí vhodný posilovací ventilátor obdobně jako jsou tyto posilovací ventilátory používány u systémů ROFA společnosti NalcoMobotec
- posoudit rozsah úprav

V práci se dále věnuji problematice oxidů dusíku, zejména s ohledem na:

- jejich působením na životní prostředí a lidský organismus
- mechanismy vzniku

V další teoretické části práce se zabývám popisem různých řešení primárních a sekundárních metod.

1. Emise oxidů dusíku

Obsahem kapitoly je přiblížit vznik emisí NO_x a dopad emisí NO_x na životní prostředí. Pro zpracování kapitoly jsem čerpal z literatury [1], [3] a [4].

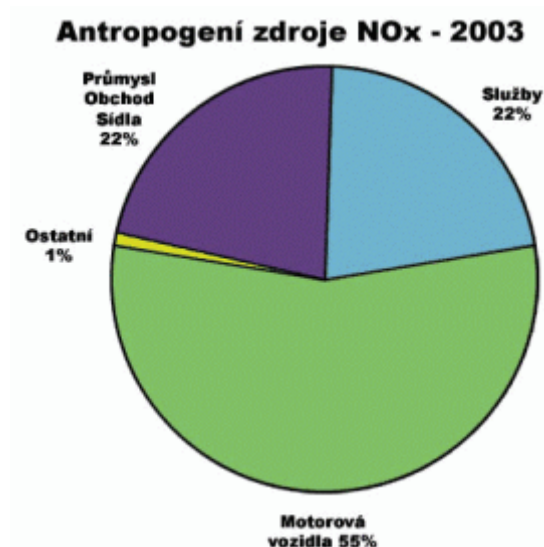
1.1 Obecný problém emisí NO_x

V současném světě, kdy je veškerá lidská činnost neúprosně spojená s velkou energetickou náročností je problematika emisí NO_x dosti zásadním problémem, který není možné podcenit nebo jinak bagatelizovat.

Emise NO_x jsou problematické především proto, že jejich vznik je nezvratně spojen se spalováním fosilních paliv a mimo to i se spalováním paliv ušlechtilých jako jsou nafta a plyn. V neposlední řadě vznikají i při spalování biomasy. Primárním antropogenním zdrojem jsou i přes využívání katalyzátorů motorová vozidla, podle obrázku 1. se motorová vozidla podílejí na produkci emisí více jak poloviční měrou. Při spalování ropných paliv v motorových vozidlech je dosahováno vysoké teploty hoření, a proto zde dochází k oxidaci vzdušného dusíku N_2 na takzvané vysokoteplotní NO_x . Při spalování paliv ve stacionárních zařízeních se tvoří především NO, jehož podíl na celkovém obsahu NO_x bývá 90 – 99 %. Obvykle se uvádí, že při spalování kapalných paliv činí obsah NO_2 1 – 10 %, při spalování tuhých paliv 1- 5 %. V této podobě se vypouštějí komínem. Po ochlazení spalin v kouřové vlečce se NO rychle mění na NO_2 , který s vodní párou tvoří HNO_3 a HNO_2 a které jsou obsaženy v kyselých deštích.

Jako další možné antropogenní zdroje produkující oxidy dusíku je nutné zařadit veškeré chemické procesy, kde jsou tyto oxidy přítomny a kde může k jejich úniku do ovzduší. Příkladem může být výroba kyseliny dusičné HNO_3 . Takováto výroba je v dnešní době vybavena účinným zařízením, které odstraňuje oxidy dusíku z odpadních plynů při výrobě.

Jako přírodní zdroj vzniku NO_x lze zmínit biologické procesy v půdách, kde mikroorganismy v rámci svého životního cyklu produkují oxid dusný N_2O a dusík N_2 . Dále je možné uvést vznik oxidů dusíku oxidací vzdušného dusíku během výbojů v atmosféře, jejich vliv je ovšem zanedbatelný.



Obr. 1 Antropogenní zdroje NO_x[3]

1.2 Základní charakteristika

Emise NO_x jsou tvořeny širokou škálou oxidů dusíku. Mezi nejčastěji se vyskytující patří:

- oxid dusnatý NO (bezbarvý plyn bez zápachu, velmi jedovatý)
- oxid dusičitý NO₂ (červenohnědý plyn štiplavého zápachu)
- oxid dusný N₂O
- oxid dusitý N₂O₃
- tetraoxid dusíku N₂O₄

Z důvodů, že nejčastěji se vyskytujícími prvky v produktu hoření uhlí jsou NO a NO₂, jsou v tabulce 1 uvedeny hustoty pouze těchto dvou látek. Jak je vidět hustoty obou látek jsou mírně vyšší nežli vzduch. To je důvod např. fotochemického smogu.

Látka	Hustota při 101,325 kPa, 20°C [kg.m ⁻³]
vzduch	1,29
NO	1,43
NO ₂	1,448

Tab. 1 Hustoty plynů

1.3 Mechanismy vzniku emisí při spalování

S využitím literatury [1] a [4]

V současné době jsou známy tři mechanismy tvorby oxidů dusíku při spalování

- palivové NO_x
- promptní
- vykosoteplotní NO_x

1.3.1 Palivové NO_x

Tyto NO_x vznikají ze samostatného dusíku obsaženého v palivu. Mechanismus tvorby je založen na tom, že ve své podstatě jednoduché sloučeniny N ze skupiny aminů (vazby N – H a N – C) nebo kyanidů ($-C \equiv N$) se vytvoří z původních sloučenin dusíku obsažených v palivu (N – X). Tyto mohou následně reagovat těmito způsoby:

1. $X - N; -C \equiv N \longrightarrow -N - H + N - C$
2. $X - N; -C \equiv N \longrightarrow$ látky obsahující O za vzniku NO
 \longrightarrow látky obsahující N za vzniku N₂

Druhý způsob reakce je ovlivněn lokálními podmínkami, mezi něž patří např. vytvoření redukční atmosféry v oblasti spalování.

Přeměna dusíku, obsaženého v palivu, na NO obsaženého ve spalínách je jen částečná. Podíl přeměněného dusíku, který přechází do spalín ve formě NO k celkovému obsahu dusíku, se nazývá konverzní poměr ν a je vyjádřen vztahem:

$$\nu = \frac{\text{N v palivu přeměněný na NO}}{\text{N v palivu organicky vázaný}} < 1 \quad (1)$$

S rostoucí hodnotou obsahu dusíku obsaženého v palivu tento poměr klesá, viz Tab. 2. Nejčastější obsahy dusíku v palivech jsou:

- černé uhlí 0,2 – 3,5%
- ropa 0,2 – 0,5%
- zemní plyn bez organického N

Palivo	Konverzní poměr ν
Černé uhlí:	
práškové kotle	0,1 – 0,6
roštové kotle	0,08 – 0,2
Hnědé uhlí:	
práškové kotle	0,1 – 0,3
Komunální odpad	0,12 – 0,7
Fluidní spalování:	
stacionární kotle	0,1 – 0,3
cirkulační kotle	0,0 – 0,025
Ropné produkty	
těžký olej	0,4 – 0,5
plynový olej, petrolej	0,85 – 1,0

Tab. 2 Závislost konverze dusíku v palivu na technologii spalování a palivu [3]

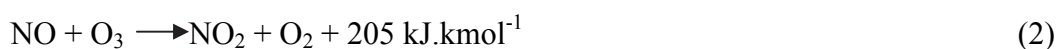
Při spalování uhlí jsou palivové NO_x významné z pohledu celkové produkce emisí NO_x . Při teplotách nad 900°C je produkce palivových NO_x silně závislá na koncentraci molekulárního kyslíku v zóně hoření a málo závislá na teplotě. Samotný molekulární dusík neovlivňuje tvorbu palivového NO vůbec.

Mechanismus přeměny N na NO v uhlí se děje ve třech krocích:

- při odplynění v uhlí
- při spalování dusíku obsaženého ve vzniklém plynu
- spalování dusíku v koksu, kdy se jedná o heterogenní proces

Vzniklý NO při spalování oxiduje v atmosféře na toxičtější NO_2 . Hlavní konverze NO na NO_2 je ozón v přízemních vrstvách atmosféry.

Reakce ozónu s NO:



tato reakce je až 10^5 krát rychlejší, než je oxidace s molekulárním kyslíkem



1.3.2 Promptní NO_x

Mechanismus je založen na náhradě molekul vzdušného dusíku radikály CH_i a to v primární reakční zóně uhlovodíkového plamene. Vzniká HCN a dalšími oxidacemi přes sloučeniny NH_i vzniká NO. Stupeň přeměny HCN na NO závisí na stechiometrii a teplotě. Podíl promptního dusíku na celkovém obsahu ve spalínách, u velkých spalovacích zařízení, je z pohledu celkových emisí nízký.

1.3.3 Vysokoteplotní NO_x

Mechanismus tvorby je založen na náhradě vzdušného dusíku molekulami kyslíku. Jejich vznik je podmíněn vysokou teplotou, nad 1200°C při spalování a dostatečně dlouhou dobou výdrže na této teplotě. S rostoucí teplotou roste exponenciálně i množství vzniklých NO_x . Vysokoteplotní NO_x se tvoří se radikálovými reakcemi, jejichž mechanismus je odvislý od prostředí. Při spalování uhlí za přebytku kyslíku probíhají reakce:



a při přebytku paliva:

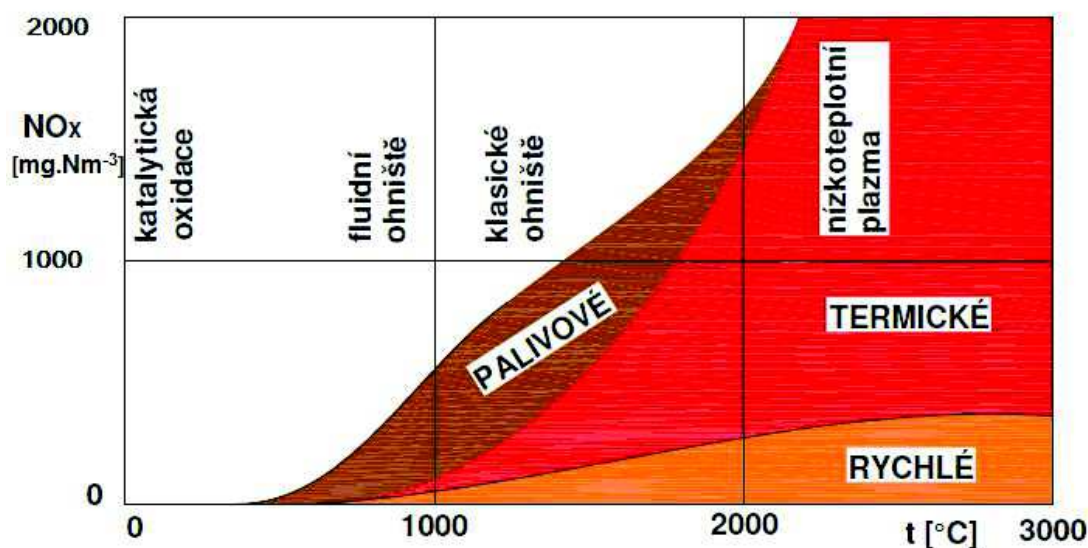


Podle Zeldoviče je možné termické NO_x stanovit podle rovnice rovnovážného stavu při přebytku kyslíku

$$\text{NO}_x = 4,26 \cdot e^{\frac{-10739}{T}} \cdot \sqrt{N_2} \cdot \sqrt{O_2} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}] \text{ nebo } [\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (7)$$

Vzhledem k potřebné teplotě a dlouhé době setrvání na této teplotě nejsou vysokoteplotní emise NO_x rozhodující u práškových granulačních ohnišť. A to z toho důvodu, že u tohoto typu ohniště není doba setrvání paliva na vysokých teplotách dostatečná. Jiný případ nastává u výtavných ohnišť, kde vysokoteplotní NO_x mají zásadní podíl na celkových emisích NO_x . Je to dáno tím, že je zde jednak dostatečná teplota pro jejich vznik, ale i dosti dlouhá časová prodleva setrvání na této teplotě.

Na obrázku 2 je uvedená závislost vzniku emisí NO_x v závislosti na teplotě a druhu ohniště.



Obr. 2 Vznik složek emisí NO_x [6]

1.4 Dopad na životní prostředí

Dusík jako takový je biogenní prvek, to znamená, že je v přiměřeném množství nezbytný pro růst rostlin. Na druhou stranu ale oxidy dusíku jako jsou NO a NO_2 ve vyšších koncentracích rostliny poškozují a mohou způsobit jejich větší náchylnost k negativním vlivům okolí jako je mráz nebo plísň. Oxid dusičitý je společně s oxidy síry součástí tzv. kyselých dešťů, které mají negativní vliv například na vegetaci a stavby a dále okyselují vodní plochy a toky. Důvodem je fakt, že oxidy dusíku v ovzduší postupně přecházejí na kyselinu dusičnou, která reaguje s prachovými částicemi a například s oxidy hořčíku a vápníku či s amoniakem za vzniku tuhých částic, které jsou z atmosféry odstraňovány jednak sedimentací a jednak vymýváním srážkovou činností. Co je ovšem důležité, že množství dusíku, které se atmosférickou depozicí dostává do půdy, již není zanedbatelné ve srovnání s množstvím pocházejícím z průmyslových hnojiv. Dusičnanové ionty, které jsou potom obsaženy v zeminách a vodách přítomny, sice působí příznivě na růst rostlin, avšak při vysokých koncentracích může docházet k úhynům živočichů obývajících vody a nežádoucímu nárůstu vodních rostlin (tzv. eutrofizace vod).

Dalším nepříznivým vlivem způsobeným oxidem dusičitým společně s kyslíkem a těkavými organickými látkami (např. benzen, toluen, vinylchlorid aj.) je tvorba přízemního ozónu a vzniku tzv. fotochemického smogu. Vysoké koncentrace přízemního ozónu poškozují živé rostliny včetně celé řady zemědělských plodin.

1.5 Dopady na lidský organismus

NO_x obecně mohou negativně ovlivnit zdraví člověka především ve vyšších koncentracích, které se ovšem běžně v ovzduší nevyskytují. Vdechování vysokých koncentrací, nebo snad čistých plynů, ovšem vede k závažným zdravotním potížím a můžou mít za následek i smrt. Existuje předpoklad, že se oxidy dusíku váží na krevní barvivo a zhoršují tak přenos kyslíku z plic do tkání. Vdechování vyšších koncentrací oxidů dusíku dráždí sliznice dýchacích cest, a proto jsou snadno identifikovatelné.

V České republice platí pro koncentrace oxidů dusíku (s výjimkou oxidu dusného) následující limity v ovzduší pracovišť:

- PEL – 10 mg.m⁻³
- NPK-P – 20 mg.m⁻³

Celkově lze tedy na základě shrnutí jejich negativních působení konstatovat, že jsou to látky se širokým spektrem negativních dopadů jak zdravotních, tak především dopadů na globální ekosystém.

2. Vliv konstrukce kotle na emise NO_x

Množství vzniklých NO_x při spalovacím procesu je možné řídit konstrukčním uspořádáním kotle. V další části kapitoly jsou tato uspořádání s využitím literatury [1] popsána. S ohledem na zaměření diplomové práce se u některých částí textu zaměřím pouze na konstrukce užívané u práškových granulačních ohnišť.

2.1 Typ ohniště

Nejvyšších emisí NO_x při spalovacím procesu je dosaženo při provozu výtavných kotlů. Tohoto jevu je dosaženo v důsledku rychlého uvolnění tepla vztaženého na jednotku objemu spalovací komory, která je potřebná pro provoz kotle s roztavenou struskou, nemalý vliv má i vysoká spalovací teplota. Úroveň vypouštěných emisí se pohybuje v rozmezí 850 – 1200 mg.Nm⁻³. U kotlů granulačních je produkce NO_x nižší v porovnání s výtavnými kotli. Rozsah emisí je 390 – 650 mg.Nm⁻³. Hlavní podíl na tomto má fakt, že setrvávání na vyšší teplotě je po kratší dobu. U kotlů roštových je situace z hlediska množství produkovaného NO_x obdobná jako u kotlů s granulačním ohništěm. Nejnižších úrovní produkce emisí NO_x dosahují kotle spalující palivo ve fluidní vrstvě, je to způsobeno tím, že palivo je spalováno ve vrstvě tvořené z velké části inertním materiálem (popel, křemičitý písek), který má relativně nízkou teplotu 800-900°C. Úroveň emisí se pohybuje v rozsahu 170 – 400 mg.Nm⁻³.

2.2 Umístěním hořáků

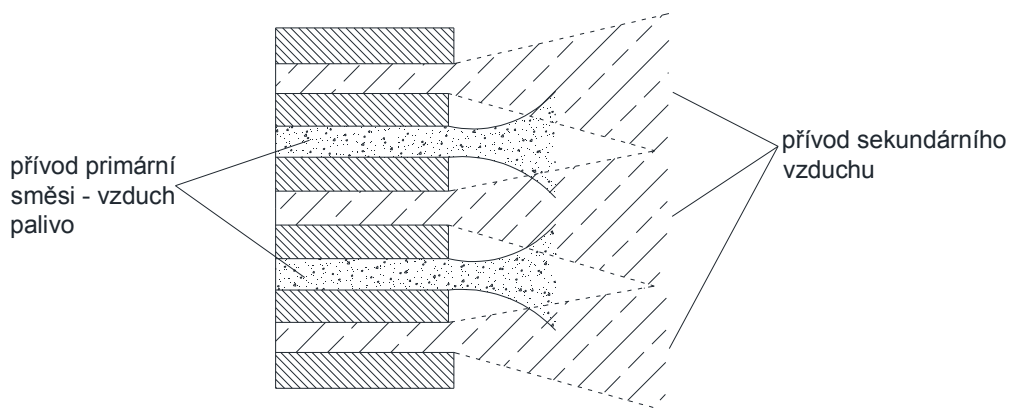
Obecně lze říct, že umístěním hořáků bychom měli ovlivňovat rovnoměrnost teplotního zatížení průřezu spalovací komory. Jako příklad konstrukčního řešení bych uvedl instalaci hořáků do rohů kotle, nazývané tangenciální, namísto hořáků ve stěnách kotle. Vhodná instalace tangenciálních hořáků zajistí příznivou produkci emisí, protože mají větší vzdálenost dohořívání než hořáky naproti sobě. Pokud není z nějakého důvodu možné instalovat rohové hořáky, je výhodné osadit hořáky obě stěny kotle namísto jedné. Obdobně výhodné vlastnosti jako mají hořáky tangenciální, mají i hořáky stropní, z hlediska délky plamene.

2.3 Druhy hořáků na spalování uhelného prášku

Podle konstrukce lze dělit hořáky na proudové a vířivé.

2.3.1 Proudové hořáky

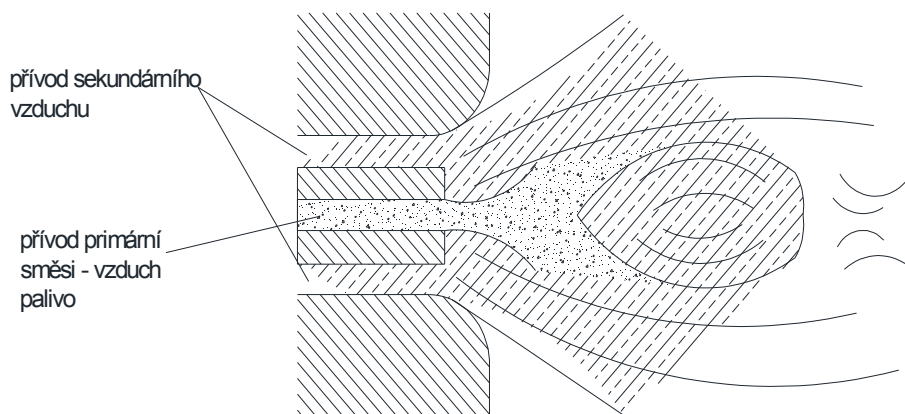
Proudové hořáky jsou řešeny tak, že mají oddělené přívody směsi uhlí s primárním spalovacím vzduchem a vzduchem sekundárním, který přívod této směsi obtéká, viz obr. 3. U tohoto typu hořáku dochází k postupnému mísení na poměrně dlouhé dráze, zapálení paliva a jeho vyhoření proběhne za nízké úrovně tvorby vzniku NO_x . Je to důsledek odplynění uhlí a jeho zapálení proběhne při nízkém obsahu O_2 , a to ještě před smísením se sekundárním vzduchem. Ke konečnému vyhoření nespáleného plynu a uhlíku v pevném zbytku dojde až po smísení se sekundárním vzduchem v dlouhém, a částečně vychlazeném plameni. Při použití hořáku dochází k vnější recirkulaci spalin v ohništi, tj. vzniklé spaliny se mohou vlivem proudění vracet před ústí hořáku pouze prostoru vně hlavního proudu.



Obr. 3 Proudový hořák[4]

2.3.2 Vířivé hořáky

Oproti tomu vířivé hořáky, viz. obr. 4, mají přívod paliva i vzduchu v jedné ose. Plamen se vytvoří ve středu hořáku a směs vzduchu s uhelným prachem po vyústění z hořáku expanduje do proudu sekundárního vzduchu vířivým pohybem. Tento jev má za následek stabilizaci plamene. Vířivý pohyb vzniká na základě rozdílných rychlostí proudů směsi uhelného prachu s primárním vzduchem a vzduchu sekundárního. Ve středové části hořáku se vytvoří tzv. recirkulační zóna, ve které se menší částice uhlí o nižší hmotnosti dostávají na obvodovou část proudu. Takto částice o větších rozměrech a hmotnosti získají lepší podmínky pro zápal v okamžiku, kdy vstoupí s horkými plyny a se vzduchem do recirkulační zóny. Tím se vytvoří turbulentní plamen, ve kterém, na rozdíl od proudového hořáku, vzniká větší množství NO_x . A to v důsledku vyšších teplot hoření. Zapálení paliva lze ovládat pomocí regulace sekundárního vzduchu, kdy tento vzduch mohou rozdělovat. Dochází u nich k vytvoření vnější a vnitřní recirkulace spalin. Vnější recirkulace probíhá stejně jako u proudového hořáku. Vnitřní recirkulace vzniká ve střední části plamene. Projevuje se zpětným prouděním spalin směrem k ústí hořáku.



Obr. 4 Vířivý hořák [4]

3. Způsoby snižování emisí NO_x

Návrh kotle a jiných energetických zařízení je poměrně komplikovaný úkol. Pro lepší orientaci v neustále měnícím se prostředí, například z hlediska politických rozhodnutí, se při návrhu zařízení využívá materiálů BAT a k nim vztažených referenční dokumentů BREF. Z těchto dokumentů je možné určit způsob primárních a sekundárních opatření vedoucích ke snížení znečišťujících emisí.

3.1 BAT

BAT (Best Available Techniques) jsou definované jako nejúčinnější a nejpokročilejší stadium vývoje technologií, činností a způsobů jejich provozování, které ukazují praktickou vhodnost určitých technik jako základu pro stanovení emisních limitů a dalších závazných podmínek provozu zařízení, jejichž smyslem je předejít vzniku emisí, nebo pokud to není možné, omezit emise a jejich nepříznivé dopady na životní prostředí jako celek, přičemž:

- technikou se rozumí použitá technologie, způsob návrhu, vybudování, provoz a vyřazení z provozu
- dostupnou technikou se rozumí technika vyvinutá pro příslušné odvětví [15]

3.2 BREF

Referenční dokumenty BREF přehledně uvádí podrobné technologické informace o nejlepších dostupných technikách v rámci Evropy. Každý dokument je obsahově poměrně úzce směřován k danému průmyslovému odvětví. [15]

3.3 Primární opatření

Primární opatření je založeno na principu potlačení vzniku NO_x při samotném spalování paliv, kdy omezím dosažení nejvyšších spalovacích teplot v kotli postupným přívodem paliva a vzduchu do hořáku. Spočívají tedy v úpravě spalování paliva v kotli. Jejich aplikace je relativně levná (ve srovnání se sekundárními opatřeními) a měly by být aplikovány ještě před sekundárními opatřeními, jejichž náklady mohou v případě nutnosti jejich zavedení zmírnit (např. úspora za NH_3 při selektivní katalytické redukci).

S ohledem k povaze úpravy spalovacího procesu se může jednat o jednotlivá jednoduchá, dílčí primární opatření až po jejich vzájemnou kombinaci ve formě nízkoemisních hořáků pro NO_x . V principu lze rozlišit tři generace primárních opatření.

3.3.1 První generace

Tato opatření jsou pro svou povahu relativně jednoduchá. Jedná se o aplikaci opatření, které mají vztah k celému objemu spalovací komory. Jsou to především tato opatření:

- spalování paliva s nízkým přebytkem spalovacího vzduchu
- snížení teploty předehřívaného vzduchu
- instalace recirkulace spalin

První generace opatření je v současné době implementována do většiny provozovaných zařízení a stala se již jakýmsi standardem.

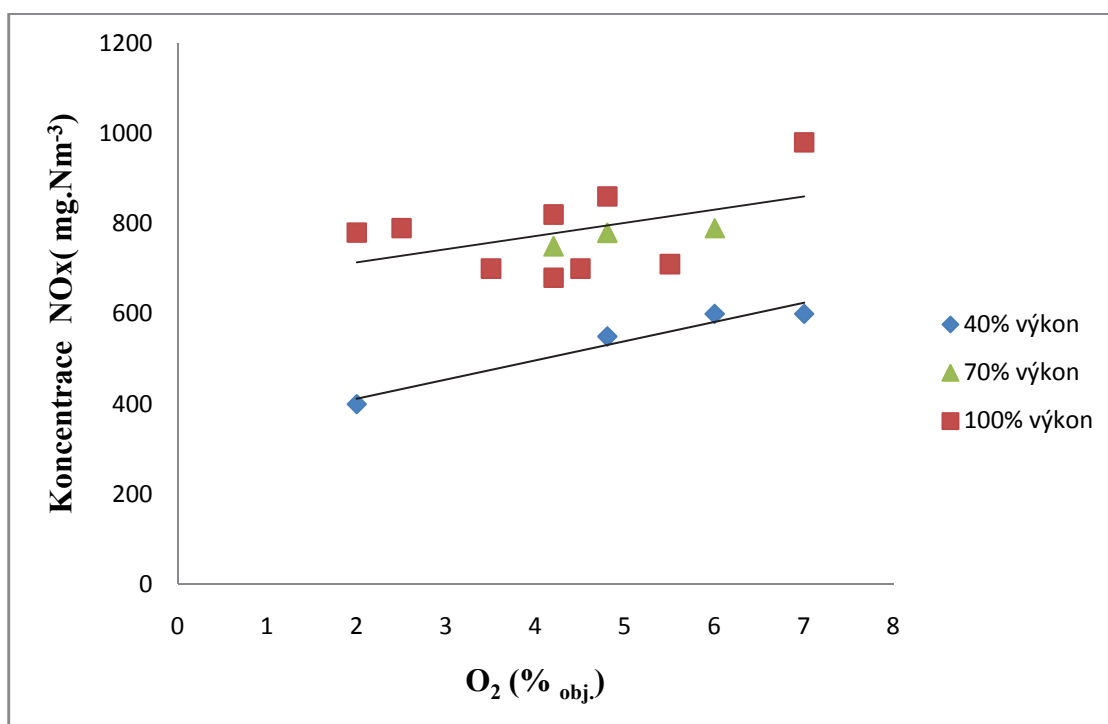
3.3.1.1. Spalování paliva s nízkým přebytkem spalovacího vzduchu

Spalování paliva s nízkým přebytkem spalovacího vzduchu je jednoduché a v současné době základním opatřením, jímž lze snížit obsah NO_x ve spalinách zejména u

kotlů tepláren a vytopen. Obrázek 5 zobrazuje tuto závislost u kotle 740 MW. Toto opatření nevyžaduje konstrukční změny v kotli a lze jeho aplikaci i zvýšit účinnost kotle, protože může dojít ke snížení komínové ztráty. Vyžaduje pouze přepočty vzduchové bilance kotle.

Snížení přebytku vzduchu může ovšem negativně ovlivnit:

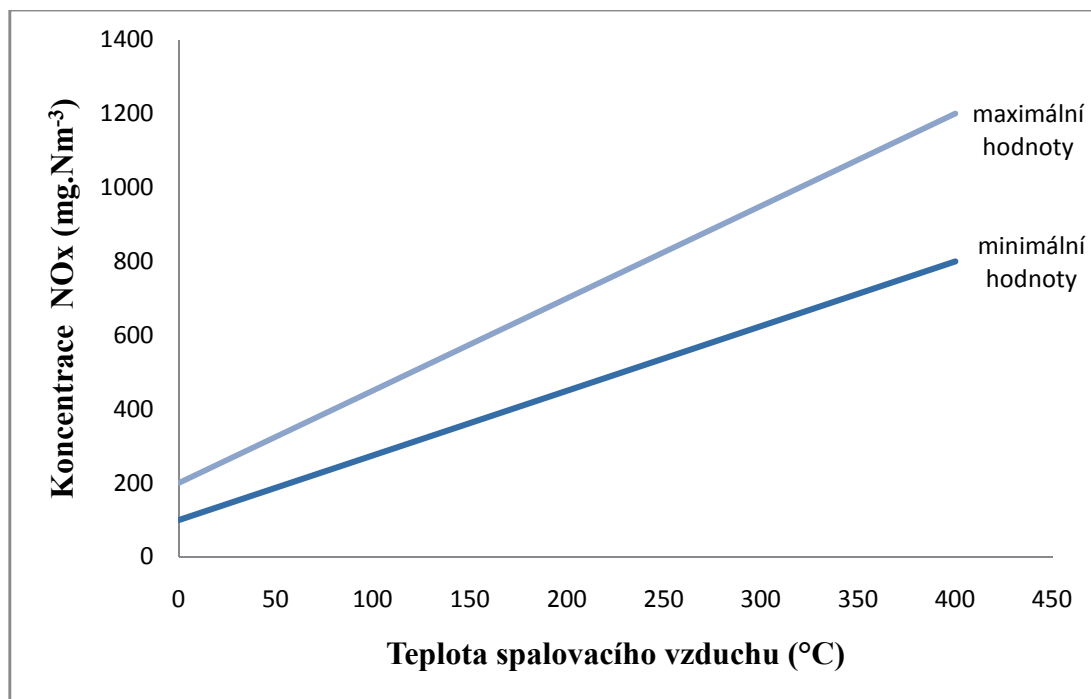
- tvorbu nánosů
- koroze teplosměnných ploch jako důsledek redukčního prostředí
- vzniku většího množství emisí CO
- neúplného spálení paliva



Obr. 5 Závislost koncentrace NO_x na přebytku vzduchu uhlénoho kotle 740 MW[4]

3.3.1.2. Snížení teploty předehřívání vzduchu

Vznik vysokoteplotních oxidů dusíku můžeme někdy omezit nižší úrovní předehřátí spalovacího vzduchu, viz. obr. 6, která snižuje teplotní maxima v primární spalovací zóně. Toto opatření nelze aplikovat na stávajících kotlích, neboť vede ke snížení účinnosti kotle a to v důsledku zvýšení teploty spalin za kotle, které jsou příčinou větší komínové ztráty.



Obr. 6 Závislost koncentrace NO_x na teplotě spalovacího vzduchu u uhelného kotle 740 MW[4]

3.3.1.3. Recirkulace spalin

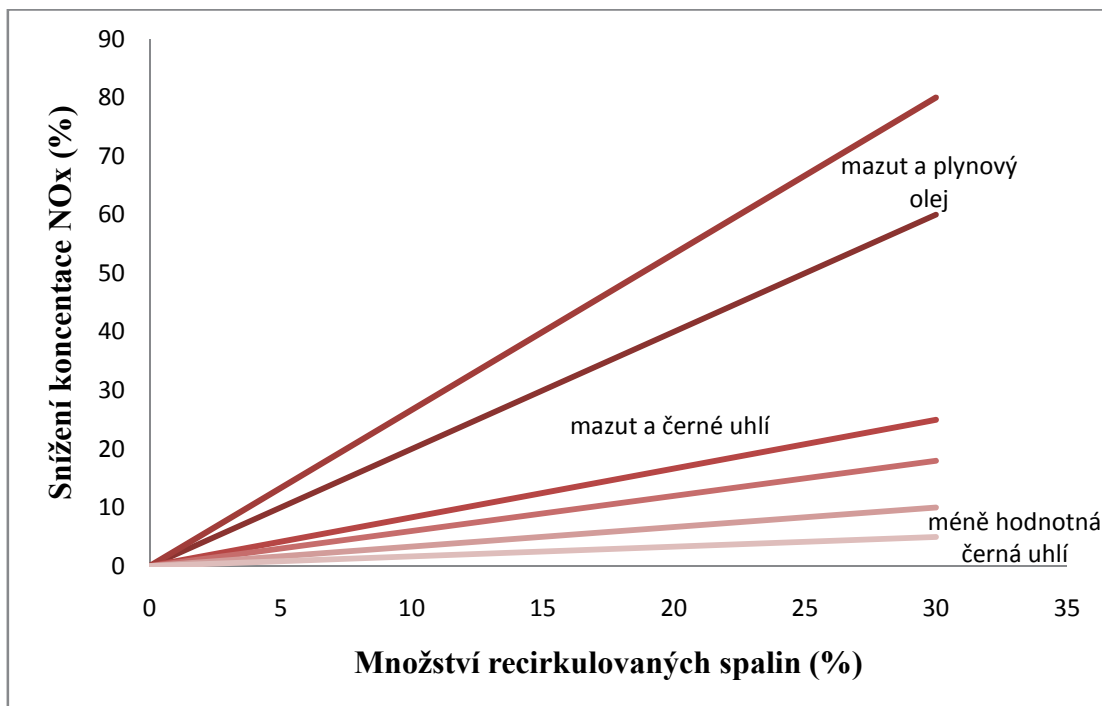
Přívodem recirkulovaných spalin do spalovacího vzduchu se sníží koncentrace kyslíku při spalování a tím se i omezí teplotní maxima v plameni u kotlů práškových. U fluidních kotlů se recirkulované spaliny používají ke chlazení fluidní vrstvy. Nejvhodnější použití této úpravy je u kotlů výtavných, a u kotlů pracujících na paliva, při jejichž spalování vznikají vysoké teploty, jako jsou kvalitní černé uhlí, kapalná paliva a zemní plyn, viz. obr. 7.

Jako nejúčinnější úprava se v praxi ukázala metoda, přivádět spaliny do primárního vzduchu jednostupňového hořáku. Při spalování uhlí se část vzduchu dopravujícího palivo k ústí hořáku nahradí spalinami, přičemž množství kyslíku, potřebné pro dokonalé vyhoření paliva se do spalovací komory dopraví sekundárním přívodem vzduchu. Takový zásah do rozdělení vzduchu ovlivní spalovací podmínky v hořáku a jeho okolí. Proto je nutné přistoupit k určitým úpravám hořáku.

V případě, že se provozovatel rozhodne instalovat recirkulaci spalin na již provozovaném kotli, musí vzít v potaz, že tato změna bude mít vliv na přestup tepla v kotli, změnu průtoku spalin a vzduchu a s tím plynoucí pozitivní i negativní dopady na celé zařízení. Především je třeba si přepočítat dopady na ekonomizér a ohřívák vzduchu. Množství recirkulovaných spalin by nemělo překročit 10%.

Dalším způsobem recirkulace je, že spaliny smísíme s chladným vzduchem. Tuto směs spalin a neohřátého vzduchu zavedeme do kotle vlastním vstupem a zvlášť do kotle přivedeme vzduch, který klasicky ohřejeme v ohříváku vzduchu. Toto opatření se

osvědčilo u lehkého topného oleje, nikoliv však u mazutu v důsledku zvýšené tvorby sazí.



Obr. 7 Závislost koncentrace NO_x na množství recirkulovaných spalín s ohledem na použitá paliva [4]

3.3.2 Druhá generace

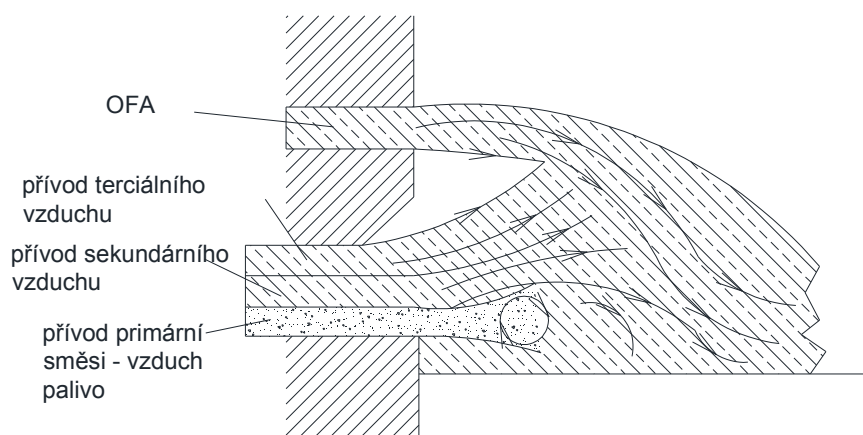
Opatření spočívají v kombinaci dvou či více jednoduchých principů, nejčastěji spojených do nízkoemisních hořáků rozmanité konstrukce. Hořáky jsou konstruovány tak, že vytvoří zónu se sníženým obsahem kyslíku v jeho blízkosti. Takto dojde k omezení nejvyšší teploty plamene. Pod označením nízkoemisní hořák se obvykle rozumí hořák s postupným přívodem vzduchu, paliva, nebo obou alespoň ve dvou stupních. Nízkoemisní hořák můžeme konstrukčními úpravami vytvořit z již existujícího hořáku. Podle principu eliminace NO_x můžeme hořáky rozdělit na:

- nízkoemisní hořáky s postupným přiváděním spalovacího vzduchu
- zavádění části vzduchu nad hořáky

3.3.2.1. Nízkoemisní hořáky s postupným přiváděním vzduchu

Principiálně pracuje nízkoemisní hořák tak, že při odděleném přivádění paliva společně s primárním vzduchem a odděleném přívodu vzduchu sekundárního se vytvoří primární plamen, ve kterém je podstecheometrické množství kyslíku. Díky přívodu sekundárního vzduchu se vytvoří vírové pole, které je nezbytné pro stabilitu sekundárního plamene. V primárním plameni se odpaří těkavé organické látky s převážnou částí dusíku obsaženého v palivu. Díky redukční atmosféře a díky tomu i vysoké koncentraci CO je oxidace palivového N na NO ve velké míře omezená. Na

obrázku 9 je znázorněn průběh hoření. V těsné blízkosti výstupu paliva do kotle probíhá zplyňování paliva, celková stechiometrie palivo : vzduch činí 10:4. Následuje progresivní zóna, kde celková stechiometrie dosahuje 10:7. V poslední zóně dojde k přidání sekundárního a terciálního vzduchu a vzduchu nad hořáky a nastane úplné vyhoření paliva s celkovou stechiometrií 10:12 potřebného množství vzduchu.



Obr. 8 Zavedení vzduchů nad hořáky [4]

3.3.2.2. Zavádění vzduchu nad hořáky

U již provozovaných kotlů se tato metoda realizuje dýškami nad poslední řadou hořáků ve smyslu prodění spalin. Uhlé hořáky mohou pracovat s mírně podstecheometrickým přívodem vzduchu, kdy vzniká redukční atmosféra a tím se omezí tvorba NO_x . K následnému dohoření paliva dojde právě díky přívodům vzduchu umístěným nad hořáky. Tato úprava je plně využitelná jen tehdy, pokud vzdálenost přívodu vzduchu od poslední horní řady hořáků je minimální, aby byla zajištěna optimální doba styku v redukční atmosféře. Nejčastější množství vzduchu použitého pro takto upravený kotel je v rozmezí 15-30%.

3.3.3 Třetí generace

Pod tímto označením se uvádí opatření zavádějící:

- nízkoemisní hořáky 2. generace s postupným přívodem paliva a vzduchu ve více stupních (na rozdíl od druhé generace, kde je palivo jen s primárním vzduchem)
- redukce oxidů dusíku v kotli (Overburning, Reburning)

3.3.3.1. Redukce NO_x ve spalinách

V technické angličtině se pro tento děj užívá názvů Overburning (přepalování) nebo Reburning (dodatečné spálení, přepálení).

V podstatě se jedná o postupné spalování. Většinový podíl paliva spaluje pomocí nízkoemisních hořáků, za značného přebytku vzduchu čímž dojde k vyhoření paliva,

vychlazení plamene a potlačení vzniku termických NO_x . V druhém stupni, také nazývaném reburningová zóna, se do vzniklých spalin přivádí další díl paliva, obvykle v rozmezí 7-15%. Takto přivedené palivo má za následek vznik redukční oblasti. V této zóně dochází k redukci již vzniklých NO_x .

Při vysoké teplotě se z dodatečně přidaného paliva vytvoří radikály uhlovodíků, které reagují s oxidy dusíku vytvořenými v primární zóně na N_2 . Následuje dopalovací zóna, v níž nezreagované palivo po přidání spalovacího vzduchu dohoří.

Nutným předpokladem pro účinnou funkci této technologie je dosažení teploty v redukční oblasti 1200°C a doba reakce reagujících látek alespoň 0,1 s. K finálnímu vyhoření paliva dojde v dopalovací zóně.

Palivem vhodným pro vytvoření redukční zóny jsou veškerá skupenství paliv, která máme, např.: zemní plyn, kapalná paliva nebo i uhlí. Z důvodu cenové dostupnosti by nám nejvíce vyhovovalo jako přídavné palivo uhlí, které však tvoří značné množství nedopalu. Proto v tomto případě k uhlí, vedenému do dopalovací zóny, recirkulujeme i horké spaliny odebírané před ekonomizérem s teplotou $350 - 650^\circ\text{C}$. Pyrolýzou paliva se tak vytvoří plynná fáze, dále vedená do spalin s cílem vytvořit redukční zónu, zatím co vzniklý polokoks se oddělí v předřazeném cyklonu a přidává se s hlavním podílem paliva do kotle.

Tato technologie je vhodná pro nové kotle, kde se již při jejich konstrukci počítá s prostorem pro dopalovací zónu. Při aplikaci u stávajících kotlů je velkým handicapem nutná nákladná rekonstrukce.

3.3.4 Opatření vedoucí ke snížení emisí NO_x na kotli K3

V rámci možné rekonstrukce kotle K3, která by mohla vést ke zlepšení spalování a ke snížení emisí NO_x lze aplikovat technologická opatření, která můžeme považovat za opatření primární, jedná se o:

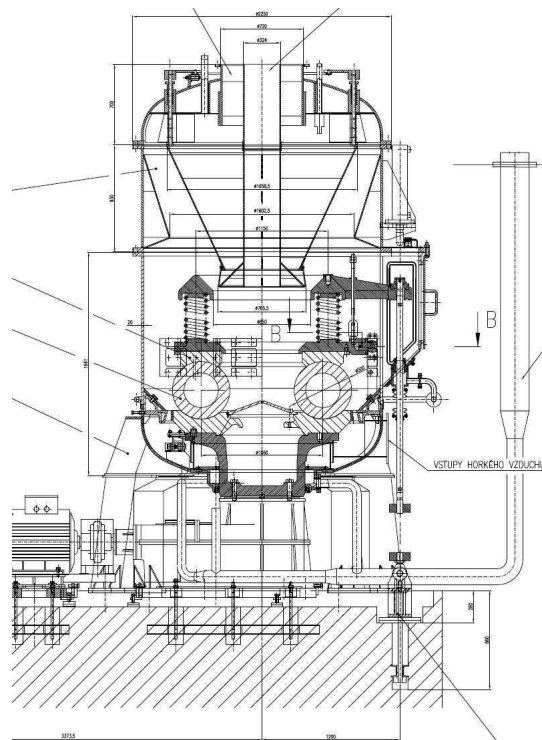
- zvýšení jemnosti mletí uhelného prášku
- recirkulace spalin
- zrovnomnění distribuce uhelného prášku a jeho zavíření

3.3.4.1. Zvýšení jemnosti mletí

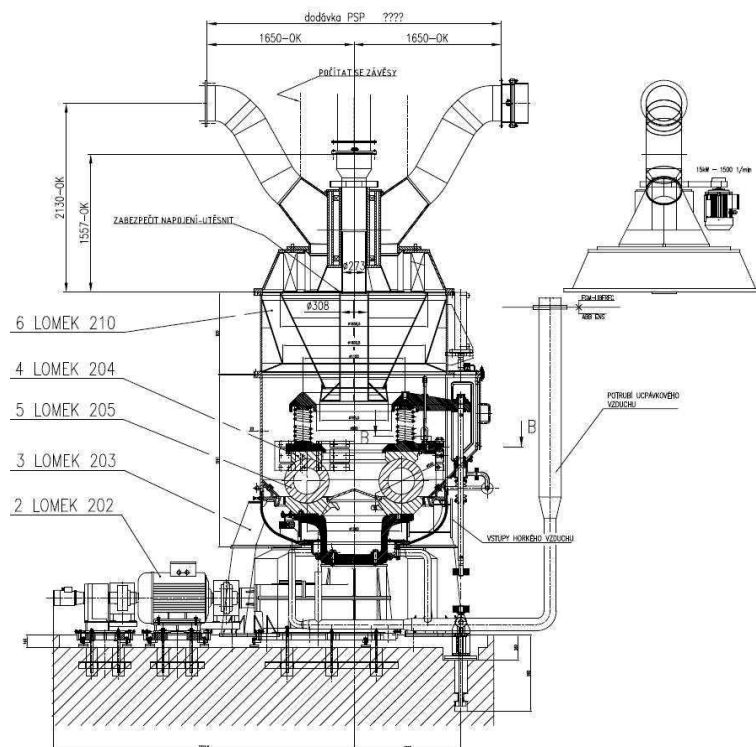
Jemnost mletí uhelného prášku na stávajících mlýnech je v současné době možná změnou polohy klapek na třídíči a změnou polohy límce. Provozními zkouškami se zjistilo, že ani změnou polohy límce třídíče u mlýnů kotle K3 není možné dosáhnout dalšího kvalitativního zlepšení v jemnosti mletí.

Pro oba mlýny byla předložena možnost zvýšení jemnosti uhelného prášku výměnou stávajícího třídíče za třídíč dynamický. Nový třídíč by byl instalován na tělo kroužkového mlýna. Zvýšením jemnosti uhelného prášku tak, aby na síti $0,09\text{ mm}$ zůstávalo méně než 30% hmotnosti odebraného vzorku, lze dosáhnout snížení nedopalu

v úletovém popílků a ve škváře nebo při dosažení stávajících hodnot CO snížení hodnot emisí NO_x.



Obr. 9 - Původní desing mlýna



Obr. 10 - Desing mlýna s dynamickým třídičem

3.3.4.2. Recirkulace spalin do mlýnských okruhů

Pro potřeby Teplárny Olomouc na kotli K3 by bylo nejvhodnější zavést recirkulované spaliny do mlýnů, které by nahradily část vzduchu zejména v provozní oblasti minimálního výkonu mlýna. Aplikace těchto uspořádání ukázaly na příznivý dopad emisí NO_x , kdy došlo k poklesu o cca 30 mg.Nm^{-3} .

3.3.4.3. Zrovnoměrnění distribuce uhelného prášku a jeho zavíření

Vhodným návrhem geometrie práškovou, tak aby docházelo ke stejnému přísunu primární směsi do každého hořáku, se dosáhne zrovnoměrnění distribuce směsi do kotle. Na kvalitu hoření mají vliv i vestavby v hořácích např.: tzv. splittler plate, které zavírají primární směs.



Obr. 11 - Proudový hořák se zavírovacími prvky – nový hořák



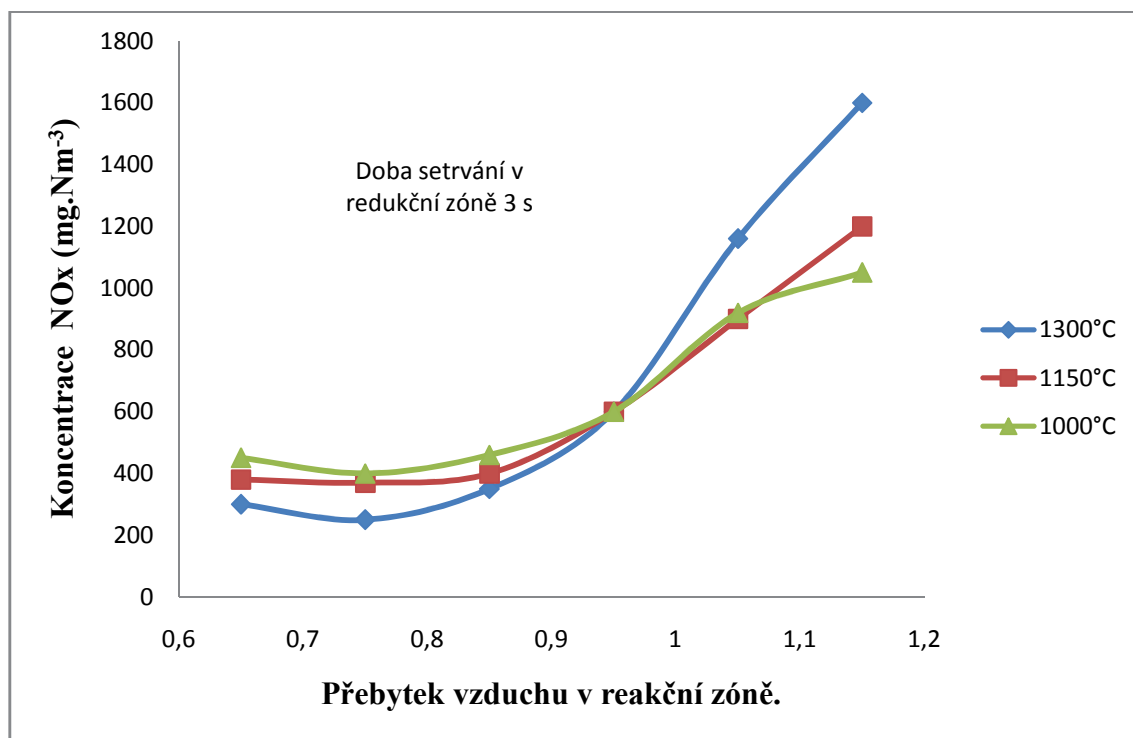
Obr. 12 Původní proudový hořák

3.3.5 Provozní požadavky primárních opatření

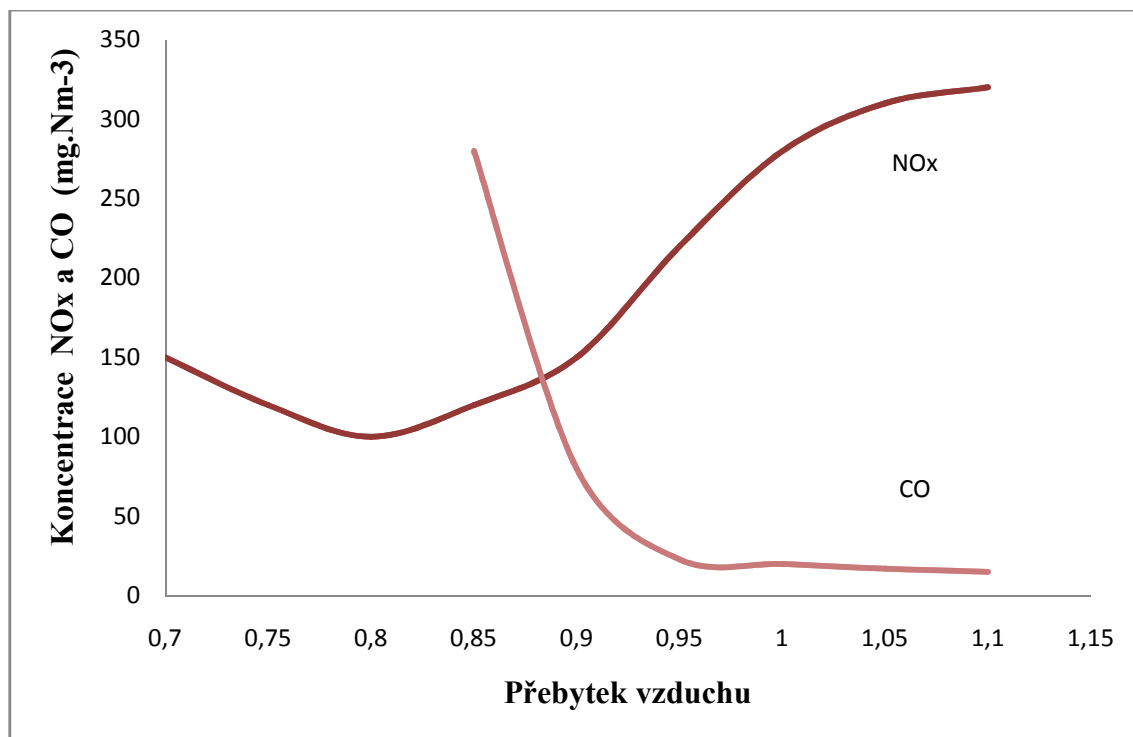
Podle obrázku 13 by bylo nejlepší vzhledem k nízké produkci NO_x provozovat zařízení s přebytkem vzduchu v rozmezí 0,7 – 0,9. Problém ovšem nastává s produkcí CO. Ta je při přebytku menším jak 0,9 velmi vysoká, viz obr. 14. Vysoká produkce CO negativně ovlivňuje chemickou ztrátu v palivu a korozi na membránové stěně kotle.

Další problémy, které mohou nastat při nevhodně aplikovaných primárních opatřeních:

- nestabilita plamene
- struskování a tečení popela
- změny na dodatkových plochách kotle (ekonomizér, ohřívák vody)



Obr. 13 Závislost tvorby NO_x na přebytku vzduchu a teplotě v ohništi u černouhelného kotle [1]



Obr. 14 Průběh vzniku NO_x a CO v závislosti na přebytku vzduchu u hnědouhelného kotle 75 MW_{el} [1]

3.4 Sekundární opatření

Sekundární opatření představují skupinu chemických procesů, při kterých dochází k destrukci již vzniklých NO_x ve spalinách aplikací chemických procesů. Jedná se zejména o procesy selektivní katalytické redukce (Selective Catalytic Reduction - SCR) amoniakem nebo selektivní nekatalytické redukce (Selective non-catalyticreduction - SNCR) rovněž amoniakem nebo močovinou.

Sekundární opatření přicházejí na řadu až ve chvíli, kdy nejsme schopni dosáhnout požadovaných limitů vypouštěných emisí metodami primárními. Jedná se o snižování koncentrací NO_x ve spalinách chemickými nebo fyzikálně chemickými procesy. Obě tyto metody probíhají za zvýšených teplot.

3.4.1 Metoda SCR

Podmínky pro správný průběh reakce jsou dány především teplotou, která se pohybuje v intervalu 80 – 450°C. Tato reakce probíhá za použití katalyzátorů. Katalyzátory mohou být na bázi kovových aktivních složek, uhlíkových aktivních složek a zeolitů. Reakce na zeolitech a kovových katalyzátorech se liší od té, co probíhá na uhlíkových katalyzátorech. Na kovových katalyzátorech a zeolitech se jedná o děj zakládající se na difúzi NO k adsorbovanému NH₃, nazývaný též Eley – Ridealovým mechanismem. Reakci je možné poté zjednodušeně rozdělit na pět kroků:

- adsorpce NH₃ na povrchu katalyzátoru

- difúze NO k adsorbovanému NH₃
- reakce NH₃ s NO na povrchu katalyzátoru
- oxidace hydroxidů
- regenerace aktivních míst na katalyzátoru

U uhlíkových katalyzátorů je oproti kovovým a zeolitům reakce mírně odlišná, proces probíhá podle mechanismu Langmuir – Hiselwood, který je charakteristický tím, že dochází k současné adsorpci NH₃ i NO_x.

Podle konstrukce se katalyzátory dělí na:

- blokové s vylisovanými otvory
- deskové
- peletizované

3.4.1.1. Blokové s vylisovanými otvory

Takovýto katalyzátor je tvořen keramickou nosnou podložkou, na kterou je nanesen samotný katalyzátor. Katalyzátor se skládá s nosiče, kterým může být např. TiO₂ a katalyticky aktivní složky. Nejběžněji používané katalyticky aktivní složky jsou V₂O₅, WO₃ a MoO₃. Blokové katalyzátory mají obecně velký specifický povrch. Velikosti otvorů v bloku jsou značně variabilní, aniž jakkoliv ovlivní vnější rozměry bloku. Po upotřebení jsou bloky ukládány na složiště.

3.4.1.2. Deskové

Deskový katalyzátor je složen z kovových mříží, na které se nanáší vlastní materiál katalyzátoru. Geometrickým parametrem, který je určující je vzdálenost mezi dvěma deskami, která je ovšem proměnná, v závislosti na koncentraci popílku ve spalinách. Výhodou je lepší odolnost proti zanášení prachem ve srovnání s katalyzátorem blokovým. Naopak nevýhodou je jeho snadné podlehnoutí abrazivním účinkům popílku, v důsledku mechanického nebo tepelného namáhání je rovněž možnost, že katalyzátor odpadne od kovového podkladu. Nároky na kovovou podložku jsou rovněž nemalé. Musí odolávat korozi v dosti náročném prostředí – vznik kyseliny sírové, při podkročení rosného bodu. Co se týká likvidace použitých katalyzátorů, jsou jednodušší než u deskových. Po mechanickém odstranění katalyticky aktivní vrstvy se podložka vyžihá v peci.

3.4.1.3. Peletizované

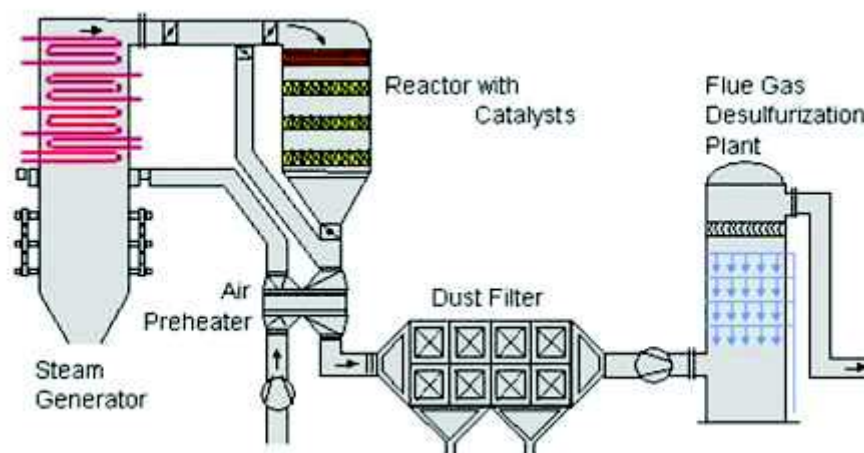
Jako peletizovaný katalyzátor se nejčastěji používá pro aktivní uhlí výjimečně pro zeolity. Jeho uplatnění je buď v nehybné vrstvě, nebo fluidním loži. V zařízeních kde úroveň prachu dosáhne hodnoty 20 – 30 mg.m⁻³, je nutné užít fluidní vrstvu.

3.4.1.4. Umístění SCR v technologickém celku

V provozech se nejčastěji používá tři variant uspořádání technologie SCR. Liší se především úrovní odprášení spalin a teplotou spalin.

3.4.1.5. Uspořádání HIGT DUST

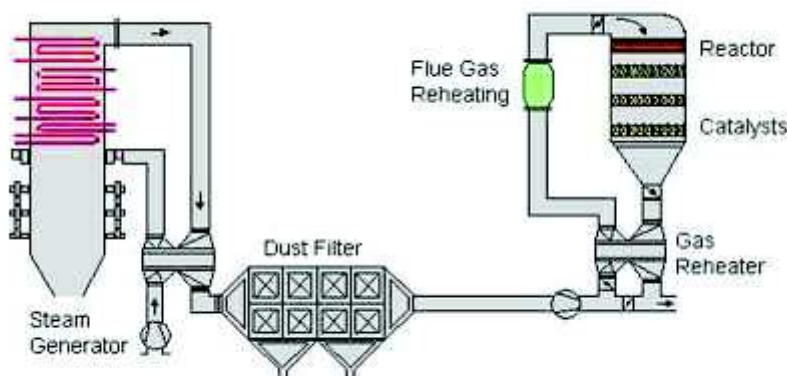
Nejrozšířenější alternativou je instalování SCR přímo do neoprášených spalín. Odbočka ve spalinové cestě se provede nejčastěji mezi dodatkovými plochami kotle (mezi ohřívákem vody – EKO a ohřívákem vzduchu). Po denitrifikaci spaliny pokračují do filtru pevných částic. Tento filtr může být elektrostatický nebo tkaný hadicový. Odprášené spaliny, v případě že nejsou odsířené, postupují do odsířovací jednotky a poté jsou přes regenerační ohřívák vypouštěny do komína. Případ, kdy jsou spaliny odsířené již na výstupu z kotle, může být u fluidních kotlů, kde se používá suchá cesta odsíření přidáváním vápence přímo do ohniště. Výhodou této varianty je, že není třeba externí přívod tepla pro denitrifikaci. Nevýhodou je ucpávání nebo otrava katalyzátoru.



Obr. 15 HIGT DUST uspořádání [7]

3.4.1.6. Uspořádání LOW DUST

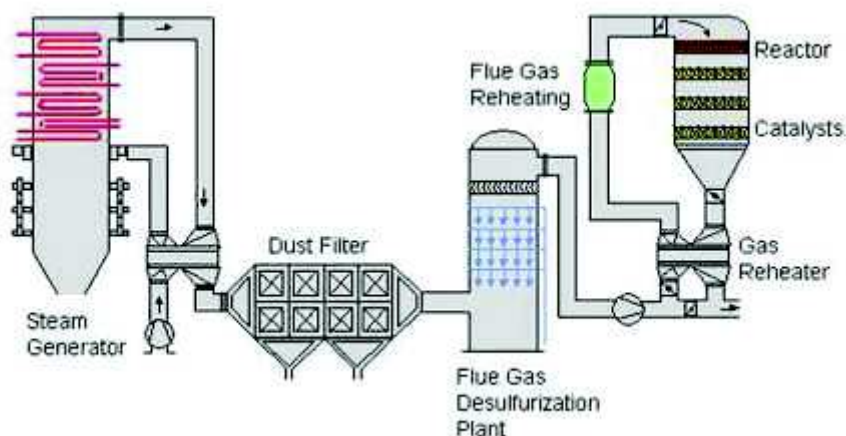
Takové uspořádání počítá nejprve s vysokoteplotním odprášením spalín ve filtru na vyšší teploty (až 380°C). Až po zbavení spalín popílku vstupují spaliny do reaktoru s katalyzátorem. Za reaktorem je regenerativní ohříváč vzduchu a technologie stejná jako u alternativy HIGT DUST.



Obr. 16 LOW DUST uspořádání [7]

3.4.1.7. Uspořádání TAIL END

Poslední variantou je zařadit reaktor s katalyzátorem až na konec spalinové cesty, tzn., spaliny klasicky prochází po výstupu z kotle odlučovačem popílku při teplotě 150°C, a poté vstoupí do odsiřovací jednotky. Za touto jednotkou následuje ohřev spalín např. zemním plynem na teplotu 300 – 420°C pro kovový nebo zeolitový katalyzátor nebo 80 – 150°C pro aktivní uhlí. Výhodou varianty je, že zařízení je umístěno mimo kotelnu, a proto existuje možnost takovéto zařízení instalovat do již provozovaných zařízení bez relativně velkých rekonstrukčních zásahů, dále je to dlouhá životnost katalyzátoru a nízká míra zanášení se popílkem. Nevýhodou je dodatečný přívod tepla.



Obr. 17 TAIL END uspořádání [7]

3.4.1.8. Reaktory pro SCR

Reaktory umístěné na kotlích pro uhlí, kde jsou systémy uspořádání HIGT DUST se umísťují vertikálně ve směru postupu spalín. Spaliny vstupují do reaktoru v horní části, aby se prach neusazoval na površích katalyzátoru a tím se snížila možnost ucpání katalyzátoru. Na vstupu do reaktoru jsou rovněž instalovány usměrňovací desky, mající za úkol směřovat tok spalín přes celou plochu reaktoru a tím homogenizovat celé pole koncentrací NO_x . Amoniak se z nádrže, která je tlaková, vede do odpařovače, kde se ohřívá teplou vodou. Páry se mísí se vzduchem nebo spalinami a zavádí se do vrchu reaktoru. Všechny reaktory jsou vybaveny odtokem spalín z důvodů odstávek.

3.4.2 Požadavky na katalyzátor

Protože umístění katalyzátorů v toku spalín, které představuje značně agresivní prostředí, jsou požadavky, co se týče odolnosti, na katalyzátor dosti vysoké. Katalyzátory musí splňovat:

- vysokou aktivitu při širokém rozsahu teplot
- vysokou selektivitu tj. nízký stupeň konverze SO_2 na SO_3
- chemickou odolnost vůči: SO_2 , halogenvodíkům, alkalickým kovům a kovům těžkým jako je As

- odolnost proti náhlým teplotním změnám
- mechanickou odolnost, zejména vůči abrazi
- nízkou tlakovou ztrátu
- dlouhou životnost
- nízkou cenu

3.4.3 Materiály katalyzátorů

Jak je již výše zmíněno katalyzátory mohou být založeny na různých bázích. Zde jsou některé vyjmenované:

- oxid titaničitý
- oxid železa
- zeolit (porézní hydrát aluminosilikátu)
- aktivní uhlíkový materiál (aktivní koks, hnědouhelný polokoks)

3.4.4 Otrava katalyzátorů

Je jednou z možných příčin vyřazení katalyzátoru z provozu. Otrava je způsobena blokováním nebo poškozením aktivních míst sloučeninami, které mají afinitu ke katalyzátoru. Otravující látky odcházejí v popílku a vznikají nejčastěji při spalování uhlí. Při ochlazení spalin zkondenzují na nejjemnějších částicích popílku. V rozsahu běžných spalovacích teplot se z práškového uhlí vypařuje 2 – 6% popílku. Nejběžnějším katalytickým jodem je arzen. Ten se v uhlí při teplotách nad 1400°C oxiduje na oxid arzeničný a následně se vypařuje. Při ochlazení se naváže na popílek a spolu s ním putuje do reaktoru, kde dojde k otravě katalyzátoru.

3.4.5 Úsady a eroze

Póry katalyzátoru mohou být vlivem kapilární kondenzace nebo malými částicemi popílku blokovány. Usazování a následné blokování pórů je závislé na geometrii a uspořádání popílku, rovněž má vliv obsah popílku ve spalinách. Samotný popílek a jeho rychlost proudění má rovněž negativní vliv na vznik eroze. Lépe erozi odolávají katalyzátory na keramické lisované podložce než ty na podložce kovové.

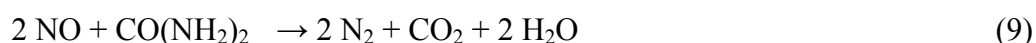
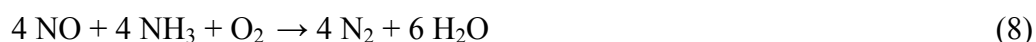
3.4.6 Životnost katalyzátorů

Nejvíce životnost a materiál katalyzátoru ovlivňuje spalované palivo a s ním spojený charakter provozu kotlů. Katalyzátory, které je nutné pravidelně vyřazovat z provozu z důvodu např. špičkového kotle, je nutné udržovat stále na požadované teplotě, kvůli poškození kondenzující kyselinou sírovou. U kotlů spalujících zemní plyn je životnost katalyzátoru 6 – 7 let, u kotlů na kapalná paliva 3 – 4 roky a u uhelných kotlů se garantuje životnost 5 let s podmínkou, že za 3 roky provozu obmění provozovatel 1/3 katalyzátoru za nový za 4 roky druhou třetinu a za 5 let poslední

třetinu. Katalyzátor se nepořizuje do zásoby, jelikož stárne, i když není používán. Stárnutí je identifikovatelné tím, že ve spalinách narůstá koncentrace NH_3 .

3.5 Metoda SNCR

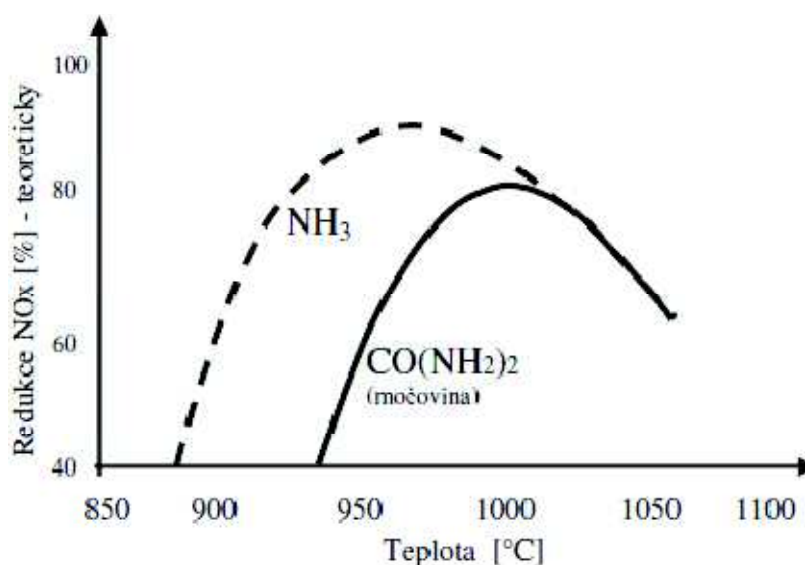
Při této chemické reakci se NO_x redukuje bez přítomnosti katalyzátoru amoniakem nebo močovinou. Teploty okna vhodná pro chemickou reakci jsou $850 - 1050^\circ\text{C}$ pro amoniak a $890 - 1100^\circ\text{C}$ pro močovinu. Teploty v kotli je třeba stanovit měřením s docela velkou přesností. V opačném případě neprobíhá reakce správně a nedosáhne se optimální výtěžnosti. Reakce u SNCR probíhá podle následujících vzorců:



Vzhledem k hodnotám teplot vhodných pro reakci, se zdá nejvhodnějším místem nástřiku činidla do kotle horní prostor spalovací komory. Dodržení teplot je rovněž důležité pro spotřebování veškerého přivedeného amoniaku. V opačném případě při podkročení teploty se amoniak, u kterého reakce neproběhla, dostává společně se spalinami do ovzduší v podobě čpavkového skluzu. Při teplotách vyšších se amoniak spálí a do ovzduší se přechází jako NO_x , které vzniknou sekundární reakcí.

Pro správný průběh reakce je kromě teploty důležitá i velikost kapek, které tvoří přivedené činidlo. Malé kapky se odpaří rychle a reakce proběhne za vyšší teploty. Velké kapky se naopak odpařují déle a reakce probíhá za teploty nižší. Proto činidlo zavádíme pomocí:

- tlakového vzduchu
- vody
- páry
- recirkulovaných spalin při použití primárních opatření



Obr. 18 Závislost redukce NO_x na teplotě

Pokud se provozovatel rozhodne osadit svoji technologii zařízením pro SNCR, měl by jistě vzít v úvahu přednosti a nevýhody jednotlivých činidel. Kapalný amoniak musí být nutně skladován v tlakových nádržích a musí se dodržovat přísná bezpečnostní opatření. Podobná opatření platí i pro čpavkovou vodu, což je roztok amoniaku ve vodě. Naproti tomu močovinu v kapalném stavu lze umístit za jistých bezpečnostních opatření v beztlakých nádobách.

Účinnost procesu SNCR je okolo 65% ve srovnání s technologií SCR. Investice jsou ovšem okolo 30% ve stejném poměru. U nejnovějších technologií SNCR výrobci udávají hodnotu čpavkového skluzu 10 mg.Nm^{-3} .

4. Základní informace o Teplárně Olomouc

Teplárna Olomouc vyrábí teplo a elektrickou energii. Teplo je využíváno pro potřeby soustavy centralizovaného zásobování teplem, výroba je jako u většiny takových zdrojů kogenerační. Závod je součástí mezinárodní skupiny Veolia a organizačně spadá pod společnost Veolia Energie ČR.

Na Teplárně Olomouc jsou instalovány dva parní uhelné kotle a to fluidní kotel K5 od společnosti Foster Wheeler o výkonu $188,5 \text{ t.h}^{-1}$ (13,5 MPa, 535 °C) a dále práškový granulační kotel K3 o výkonu 90 t.h^{-1} (6,0 MPa, 485 °C).

Teplárna Olomouc prošla v letech 1997 – 1999 rozsáhlou. V rámci této rekonstrukce v objemu cca 1,7 mld. Kč byly původní kotle K1, K2 a K4 nahrazeny fluidním kotlem K5 a kotel K3 byl rekonstruován na spalování černého uhlí společností EGM Liberec, přičemž v rámci rekonstrukce zůstaly zachovány níže uvedené části kotle:

- část zadních tahů
- ocelová konstrukce
- kouřové ventilátory a převážná část odlučovacího zařízení
- přehříváky

Kotel K3 pracuje v blokovém uspořádání s parní turbínou TG4 o výkonu 8 MWe. Blok K3-TG4 je v provozu pouze v zimním a přechodovém období a dále v létě při odstávce bloku K5-TG3. V tomto režimu dosahuje jeho vytižení cca 4000 provozních hodin za rok.

Kotel K3 spaluje černé uhlí z OKD. Vybaven je mlýnicí s přímým foukáním uhelného prášku, jejíž součástí jsou dva kroužkové mlýny ABB (Mk6-50). Spalování probíhá prostřednictvím 8 ks proudových hořáků, které jsou umístěny v rozích spalovací komory a nasměrovány tangenciálně na kružnici. Systém stávajících dohořivacích vzduchů je tvořen dýšnami vzduchu, které jsou nasměrovány také na kružnici, ovšem s obrácenou rotací.

4.1 Technický popis a základní parametry kotle K3

V tabulce 3 jsou uvedeny základní technické parametry práškového granulačního kotle K3, řez tímto kotlem je pro ilustraci uveden na obrázku 19.

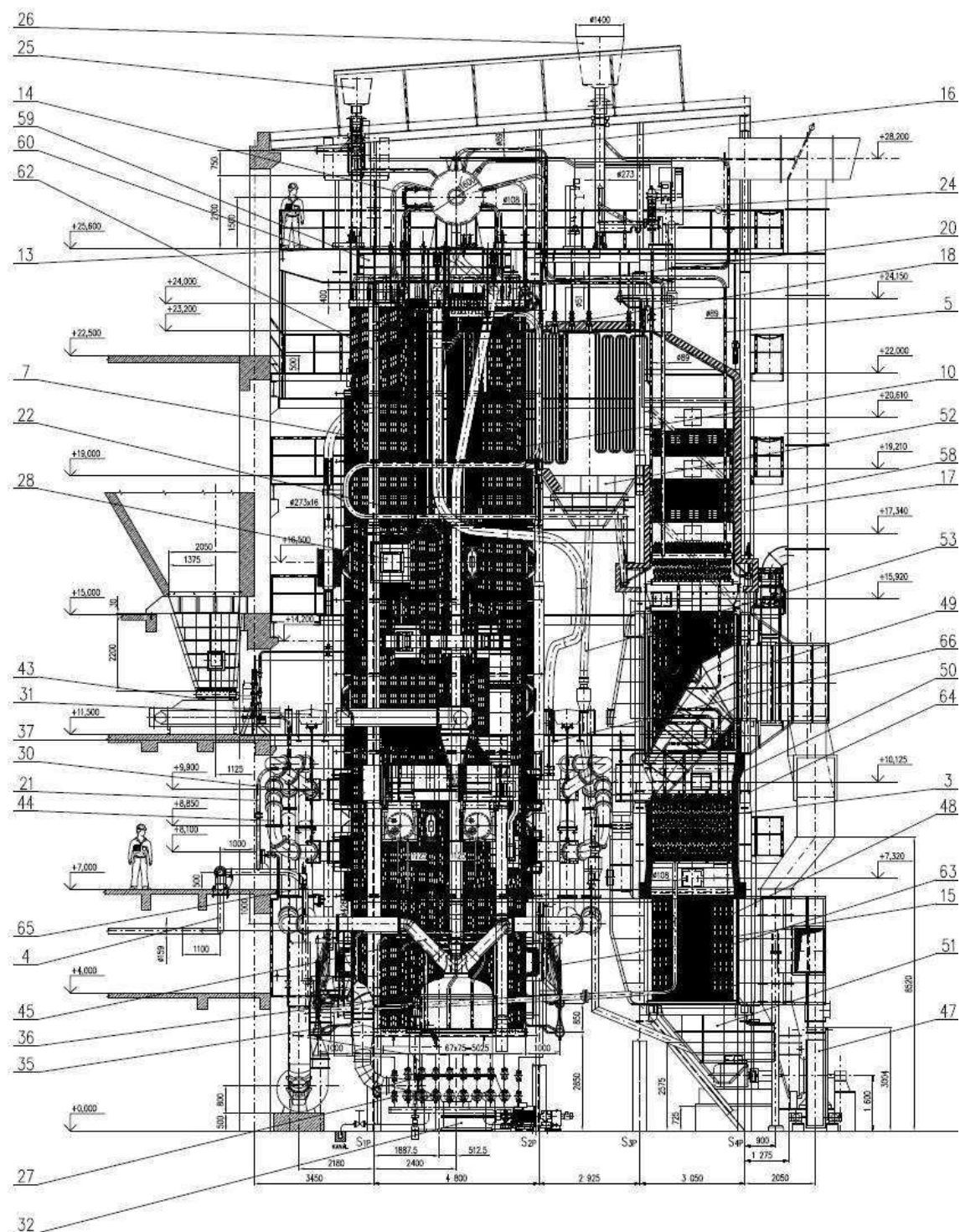
Výrobce kotle	První brněnská strojírna
Zhotovitel rekonstrukce kotle	Energomontáže Liberec,
rok provedení rekonstrukce na černé uhlí	1999
Jmenovitý výkon kotle	100 t.h ⁻¹
Minimální výkon kotle bez stabilizace	45 t.h ⁻¹
Minimální výkon kotle se stabilizací	36 t.h ⁻¹
Tlak páry za kotlem	6 MPa
Teplota výstupní páry	485 ±8 °C
Účinnost garantovaná:	
při výkonu 90 t.h ⁻¹	88,5 %
při výkonu 80 t.h ⁻¹	88,9 %
při výkonu 50 t.h ⁻¹	86,5 %

Tab. 3 Základní parametry kotle K3

Jedná se o práškový, granulační kotel, spalující černouhelný prášek. Kotel je strmotrubný, s přirozeným oběhem vody a přímým foukáním uhelného prášku. Konstruován je jako dvoutahový se svislým ohništěm se vzestupným prouděním spalin a jedním sestupným konvekčním tahem. V ohništi se udržuje podtlak, který je vytvořen kouřovými ventilátory. Spalovací zařízení je tvořeno osmi proudovými hořáky. Množství sekundárního vzduchu přiváděného do každého hořáku je měřeno. Množství primárního vzduchu je měřeno na vstupu do mlýna.

Množství sekundárního vzduchu je měřeno zvlášť pro levou a pravou stranu kotle.

Řez kotlem:



Obr. 19 - Řez kotlem K3

Spalovací komora kotle má základní rozměr 5 025 x 5 625 mm a je tvořena membránovými stěnami. Výška je 21 550 mm (rozteč horních a spodních komor).

Vzduch do kotle je nasáván společným kanálem, umístěným za zadní stěnou kotelní, podle klimatických podmínek je možno ručními klapkami zvolit sání vzduchu buď ze stropu kotelní, tzn. prostoru kotelní, nebo z venkovního prostředí. Sací kanál se rozděluje do dvou větví sání vzduchových ventilátorů RVM 1 600-4N, před kterými jsou instalovány tlumiče hluku. Vzduch je ohříván v trubkových ohřívácích vzduchu LUVO I a LUVO II, které sestávají z vertikálních trubek, zaválcovaných do trubkovnic. Spaliny proudí trubkami a ohřívají tak vzduch, proudící kolmo na trubky.

Vzduch je poté distribuován do kotle několika kanály.

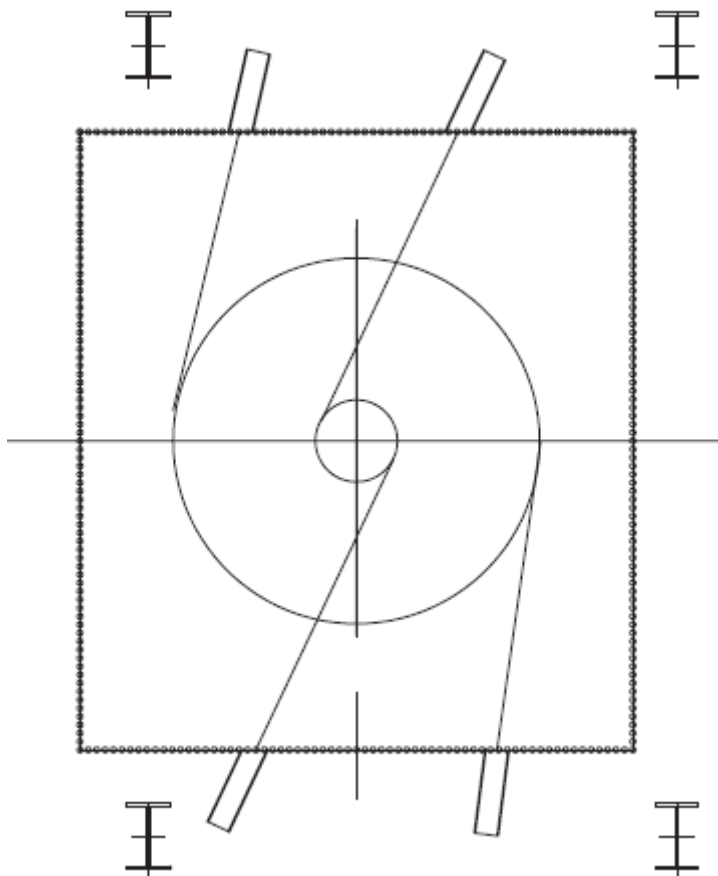
Kanály sekundárního vzduchu pro práškové hořáky, vždy pro 2 hořáky umístěné nad sebou je vzduch odebírán jedním kanálem. Kanály pro ofukovací dýzy membránových stěn spalovací komory. Kanály dohořívacích vzduchů (OFA). Po obou stranách kotle je vzduch odebírán jedním kanálem, který je rozdělen pro zaústění dvou dýz dohořívacích vzduchů v každé boční stěně spalovací komory. Kanály prohořáky LTO. Po obou stranách kotle je vzduch odebírán jedním kanálem, který se rozděluje do 2 kanálů, připojených ke vzduchovým pneumatickým klapkám hořáků LTO, ovládaných automatikou hořáků. Kanály primárního vzduchu do mlýnů. Primární vzduch do mlýnů je sveden potrubím kanálů horkého vzduchu po obou stranách kotle do sání mlýnských ventilátorů. Pro regulaci teploty za třídiči mlýnů je ze vzduchových kanálů ohříváků vzduchu LUVO I odebírán studený vzduch a zaveden po obou stranách kotle do potrubí primárního vzduchu mlýnů.

Spaliny vzniklé při spalování paliva a dostatečném vychlazení v kotli procházejí ve dvou paralelních větvích nad výsypkami II. tahu a mezitahu. Dále zplodiny pokračují přes mechanické odlučovače popílku a z nich vstupují do elektrostatického odlučovače (EO) tvořeného třemi sekcemi. Odsávání spalin z kotle do komína zajišťují 2 axiální rovnotlaké ventilátory.

5. Stávající systém dohořívacích vzduchů a jeho účinnost

5.1 Popis stávajícího systému

Stávající přívod dohořívacích vzduchů je řešen kanálem pro každou stranu kotle zvlášť. Na tomto kanálu je instalována klapka pro regulaci průtoku vzduchu a měření průtoku vzduchu. Za klapkou se tento kanál rozděluje na další dva kanály. Tyto dva kanály jsou posléze zaústěny přes membránovou stěnu do spalovací komory kotle. Konce kanálů jsou tvořeny dýzami. Tyto dýzy jsou nasměrovány na pomyslné kružnice o průměrech 746 mm a 3330 mm, vždy dvě úhlopříčně umístěné na stejnou rozteč. Smysl rotace vzduchu je opačný, než je smysl rotace plamene vyvolaný uhelnými hořáky.



Obr. 20 Stávající přívod dohořívacích vzduchů

5.2 Měření teplot a koncentrací plynů na kotli K3

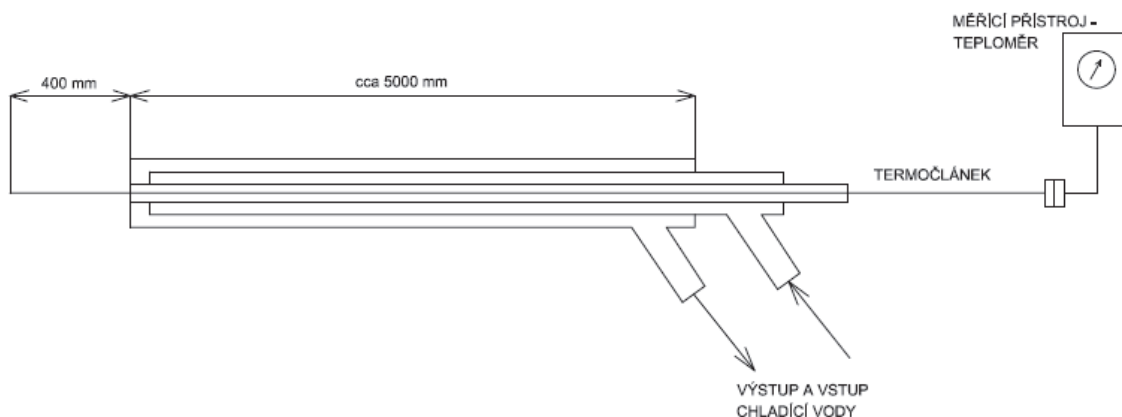
Dohořívací vzduchy jsou, jak již bylo výše zmíněno, důležitým činitelem co se týče primárních opatření. Účinnost stávajícího systému OFA vyjádřená jeho schopností rovnoměrného vykrytí vzduchem po celém průřezu spalovací komory byla ověřena dne 28.3.2015 měřením koncentrací O_2 , CO a NO_x dne 28.3.2015 měřicí skupinou VŠB – TUO.

Měření bylo provedeno ve dvou výkonových hladinách kotle, 48 a 75 t.hod⁻¹. V obou výkonových úrovních se provádělo měření teploty a odběr vzorků spalin pro stanovení koncentrací plyných látek CO , NO_x a O_2 .

5.2.1 Měření teploty

K měření teploty se přistoupilo z důvodu ověření rozložení teplot ve spalovací komoře pro vhodnost použití technologie SNCR. Rovněž by výsledné hodnoty teplot v průřezu spalovací komory mohly být použity jako porovnávací hodnoty v případě, že by se pro kotel K3 vytvářela simulace metodou CFD.

Pro měření teploty byl použit termočlánek typu „K“. Průměr termočlánu byl 3 mm, vložen byl do chlazené sondy délky cca 5000 mm s přesahem 400 mm, viz obr. 21.



Obr. 21 Chlazená sonda pro měření teploty

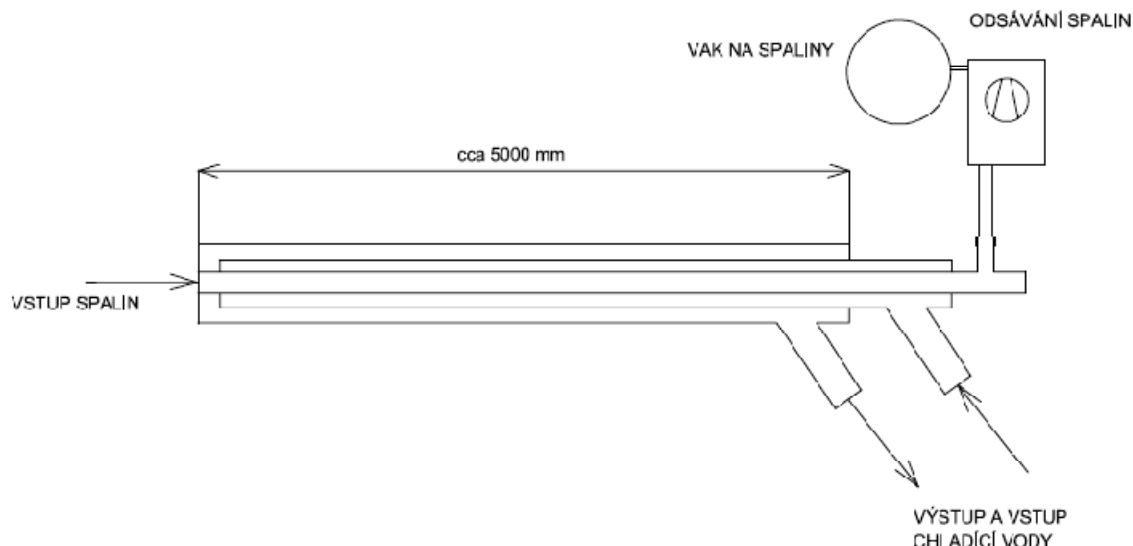
Měření bylo provedeno z přední strany kotle ve výškové úrovni +16,56 m. Měřicí místa jsou naznačena v příložené příloze 2.

5.2.2 Měření koncentrace plyných složek spalin CO, NO_x, O₂

Měření probíhalo metodou odběru vzorku spalin z příslušného místa spalovací komory. Odběrová místa jsou totožná s místy, ve kterých se provádělo měření teploty viz. příloha 2.

Odběr byl prováděn chlazenou odběrovou sondou, obr. 22, z jednotlivých odběrových míst. Pomocí sondy a vzduchotěsného ventilátoru se plyn odsával přes odlučovač vlhkosti do odběrových vaků, s objemovým tokem přibližně 10 l.min⁻¹. Po odloučení tuhých nečistot se stanovila koncentrace CO a NO_x přístrojem SIEMENS – pracujícím na principu absorpce infračerveného spektra, a koncentrace O₂ pomocí analyzátoru SERVOMEX 570A - pracujícím na principu paramagnetických vlastností kyslíku.

Uvedené výsledky jsou v [ppm] pro CO, NO_x a v [%_{obj.}] pro O₂.



Obr. 22 Chlazená sonda pro odběr spalin

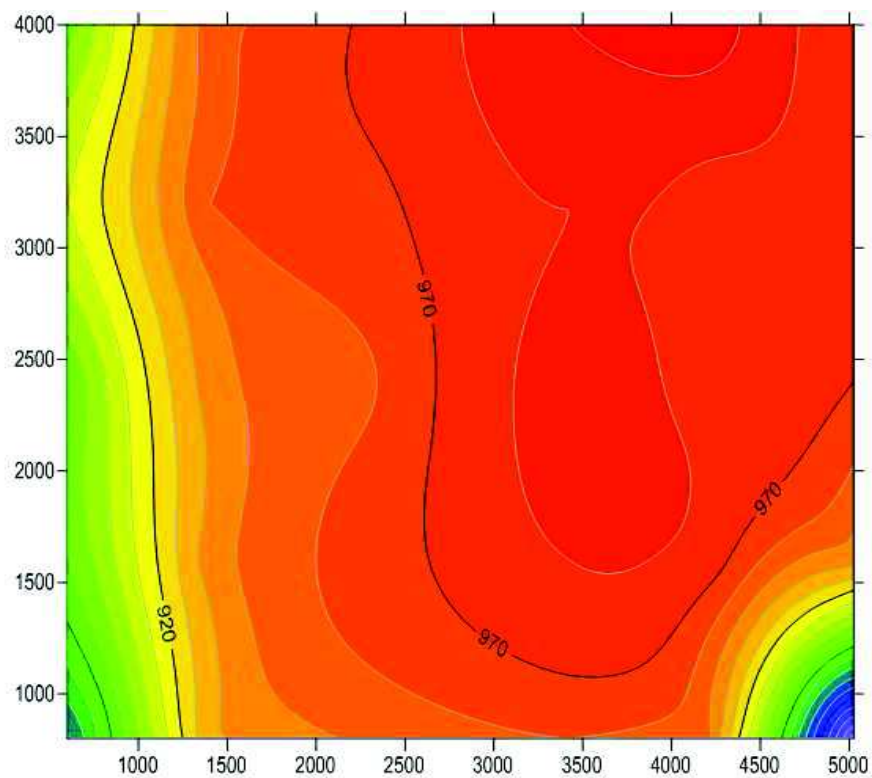
5.3 Vyhodnocení naměřených hodnot

Hodnoty teplot a koncentrací O_2 , CO a NO_x jsou uvedeny v přílohách 3 až 6. Pro vizualizaci a lepší představu o rozložení teplot a koncentrací výše uvedených plynů jsem použil software SURFER DEMO 12.

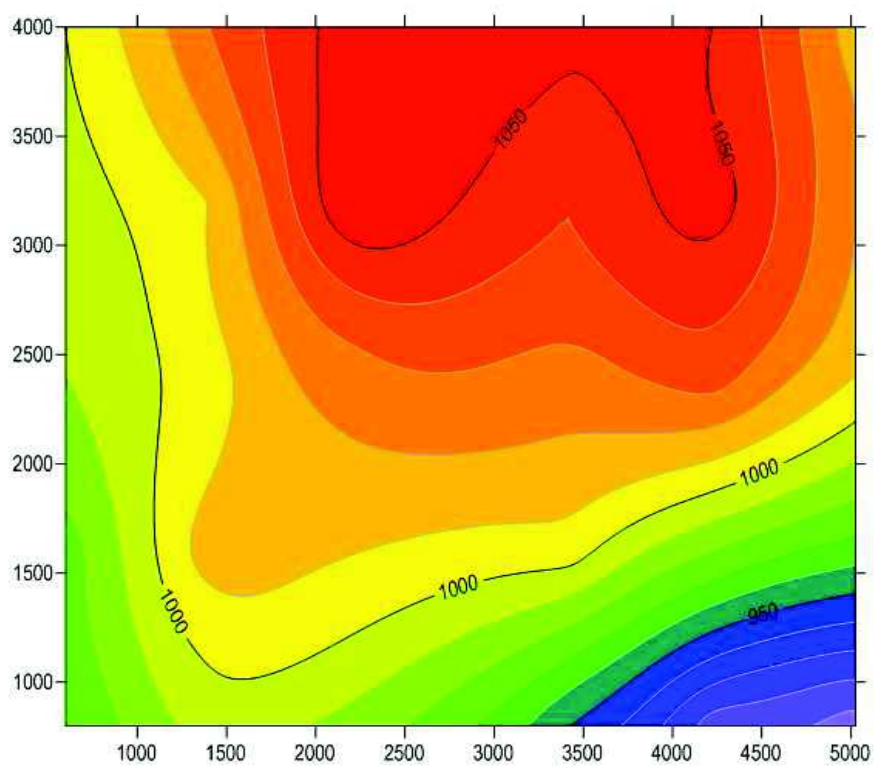
5.3.1 Vyhodnocení teplotního pole

Z níže uvedených obrázků je možné pozorovat, že rozložení teploty po průřezu spalovací komory není úplně symetrické. Co se týká vyšší teploty na zadní straně kotle, nemusí být tato skutečnost zobrazená na grafech úplně směrodatná, protože měření bylo provedeno pouze do hloubky 4000 mm, kdežto spalovací komora má hloubku 5025 mm. Měření bylo omezeno délkou sondy a dispozičním uspořádáním na kotelně. Nejvíce patrná je teplotní asymetrie při výkonu 48 t.h^{-1} páry. Je zde vidět vyšší teplota na straně pravé i na zadní stěně. Při výkonu 75 t.h^{-1} páry se teplota zvyšuje pouze u zadní stěny kotle.

Naměřenými hodnotami se potvrdilo, že v těchto místech je vhodné instalovat v budoucím čase technologii SNCR, jelikož by zde měla být příznivá teplota pro správnou funkčnost systému.



Obr. 23 Teplotní pole při výkonu 48 t.hod⁻¹



Obr. 24 Teplotní pole při výkonu 75 t.hod⁻¹

5.3.2 Vyhodnocení naměřených koncentrací

Z naměřených hodnot je opět patrné, že rozložení koncentračního pole není symetrické.

Nejvyšší koncentrace O_2 se nachází v hloubce 1800 mm od stěny a to ještě pouze místně, což znamená, že se nejedná o pokles koncentrace od stěny (ústí dýzy), ale pouze o jakýsi místní extrém. Tato koncentrace byla naměřena při výkonu kotle 75 t.h^{-1} , kdy bylo do spalovací komory dopravováno $10\,200 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ dohořivacího vzduchu dle provozního měření.

Při provozu kotle na hladině 45 t.h^{-1} nebyla naměřena žádná koncentrační špička v místech vzdálených od membránové stěny ani postupný pokles koncentrace. Množství dopravovaného dohořivacího vzduchu bylo $3000 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ dle provozního měření.

Vyšší koncentrace O_2 v místech u stěny mohou být důsledkem přisávání vzduchu okénky při měření.

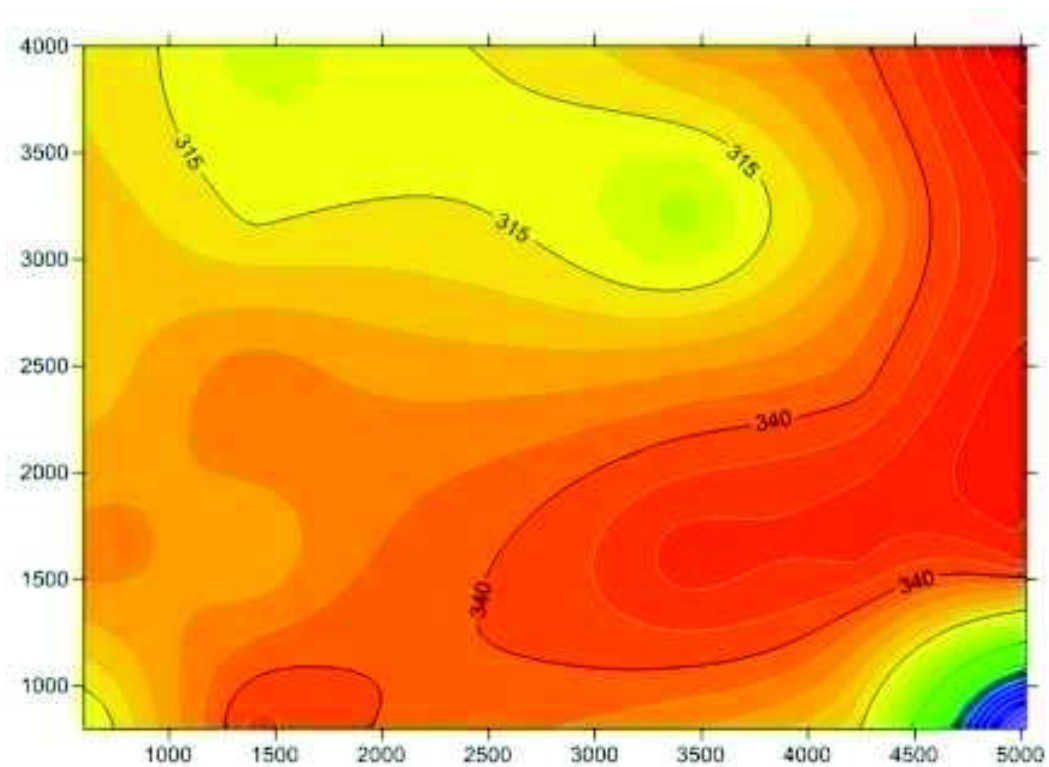
Podle měření, koncentrace CO dosahují v obou výkonových hladinách svých vrcholů v místech, kde díky své konstrukci nemohou být současné OFA dýzy účinné.

Z těchto faktů je možné usoudit, že průnik vzduchu do spalovací komory u současného systému není optimální a není možné jím efektivně regulovat emise CO , které nám nepřímo ovlivňují vznik emisí NO_x .

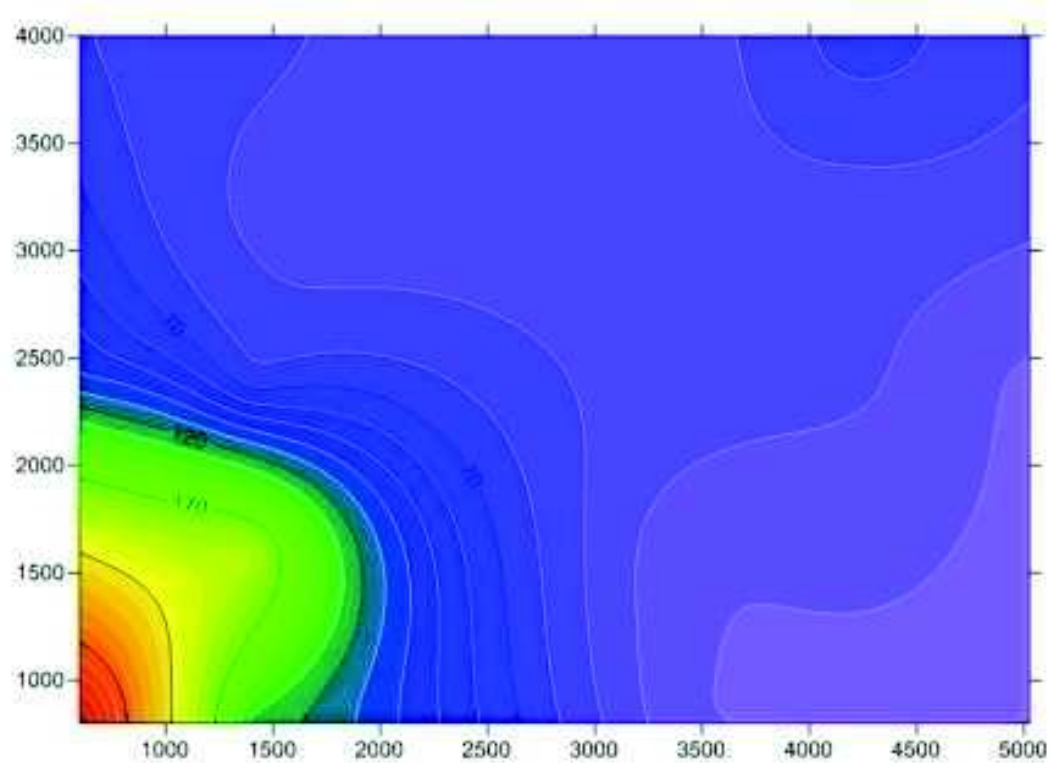
Dle faktů uvedených v úvodu práce, a tj., že při provozních zkouškách, kdy bylo dosaženo emisí NO_x na úrovni 350 mg.Nm^{-3} docházelo k stonásobnému nárůstu emisí CO , je pravděpodobně vhodné přistoupit k návrhu nového systému dohořivacích vzduchů.

Pro návrh dohořivacích vzduchů jsem se nechal inspirovat článkem uvedeným v seznamu literatury pod číslem [14].

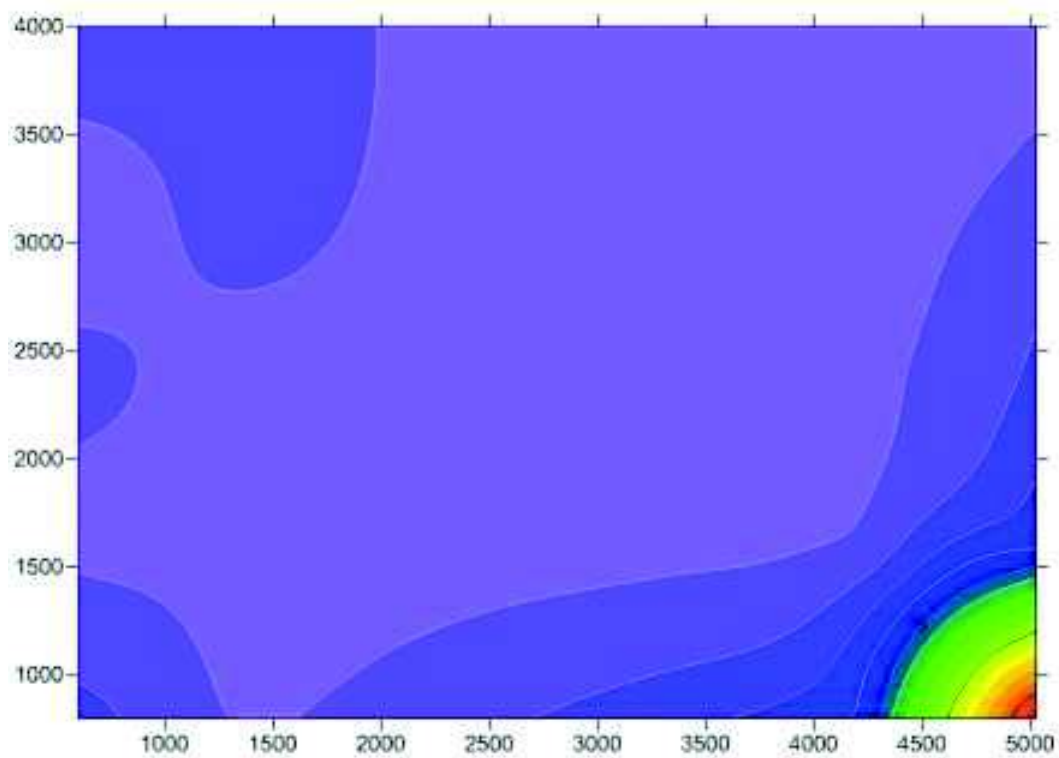
Lze potvrdit, že vhodnými úpravami vzduchového systému kotle lze dosáhnout nižších emisí NO_x při plnění emisních limitů CO .



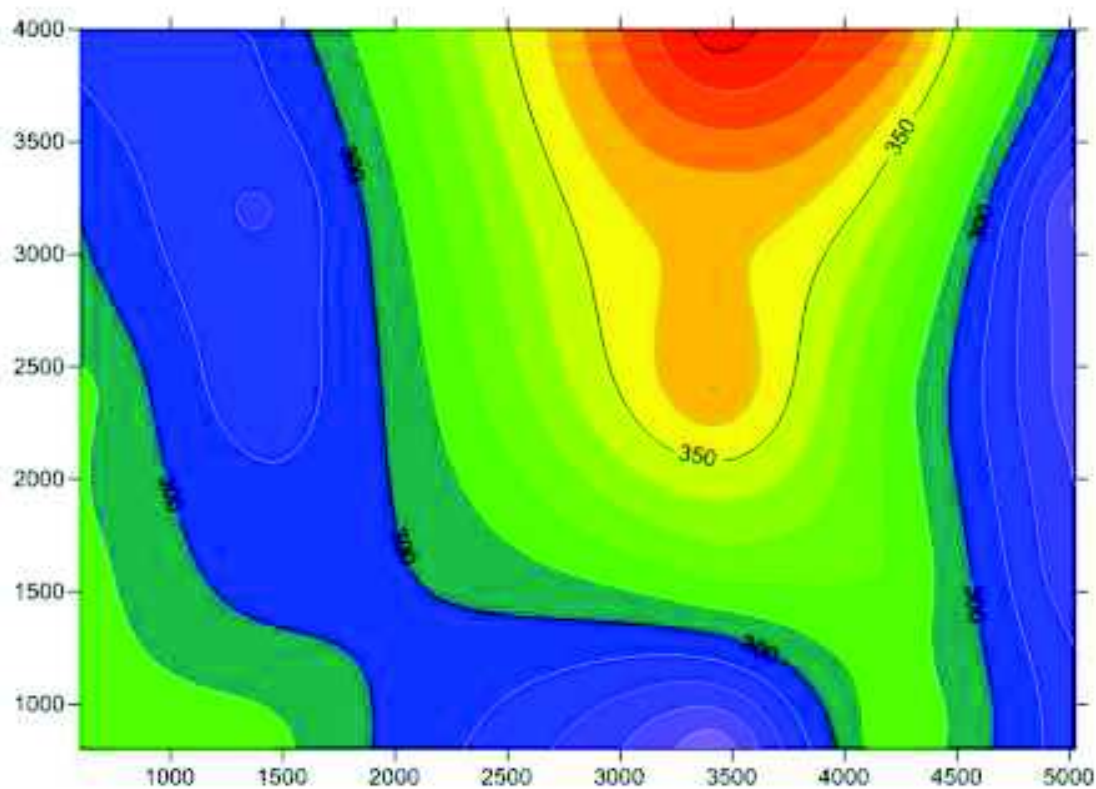
Obr. 25 Koncentrace NO_x při výkonu 48 t.hod⁻¹



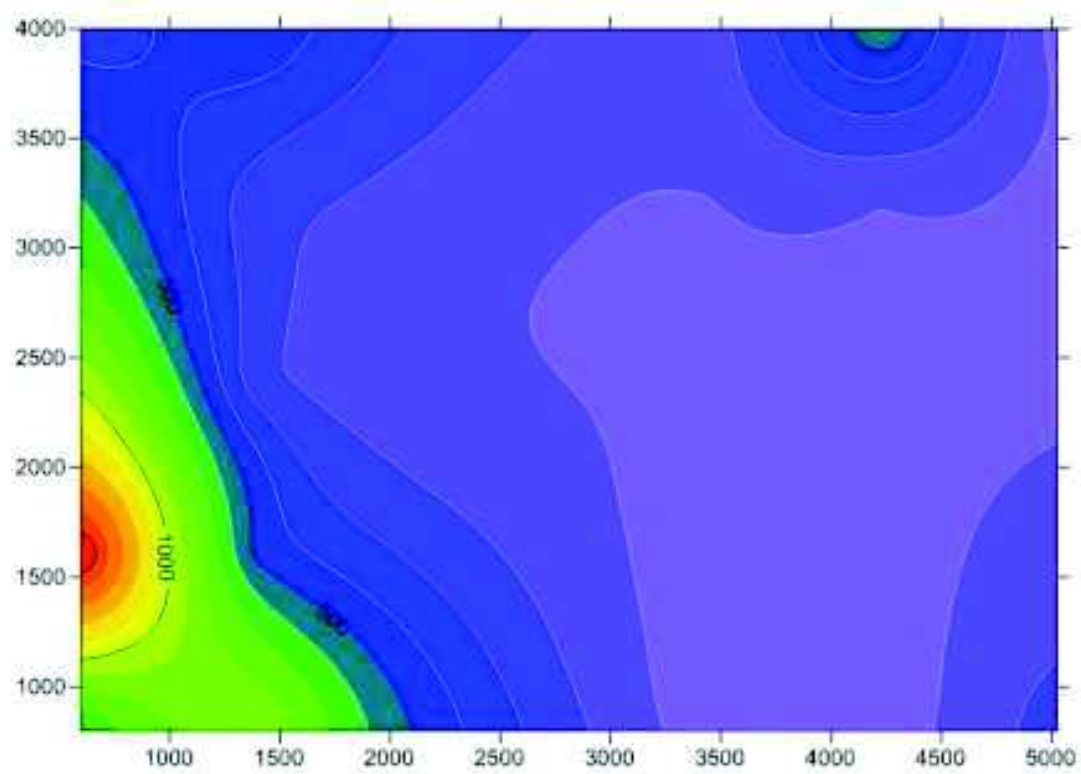
Obr. 26 Koncentrace CO při výkonu 48 t.hod⁻¹



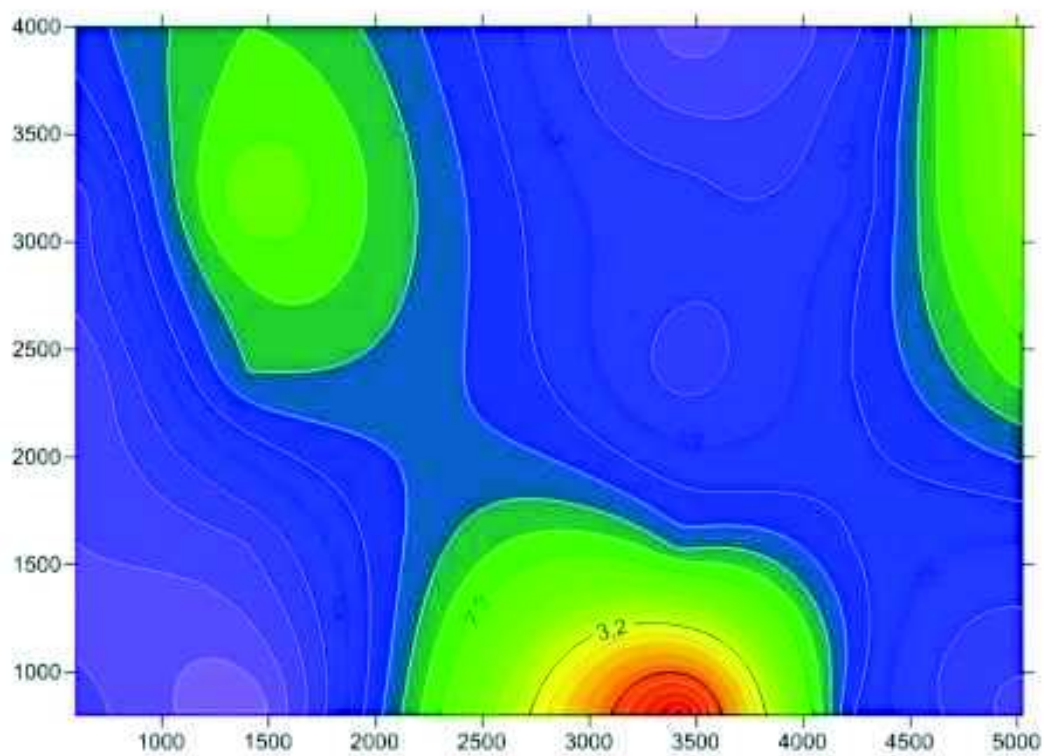
Obr. 27 Koncentrace O_2 při výkonu 48 t.hod⁻¹



Obr. 28 Koncentrace NO_x při výkonu 75 t.hod⁻¹



Obr. 29 Koncentrace CO při výkonu 75 t.hod⁻¹



Obr. 30 Koncentrace O₂ při výkonu 75 t.hod⁻¹

6. Návrh nového systému dohořívacích vzduchů

V této kapitole jsou provedeny stechiometrické výpočty spalování, tepelná bilance a výpočet účinnosti pro výkon kotle 100 t.h^{-1} páry. Pro výkon kotle 45 t.h^{-1} jsou odlišné pouze hodnoty účinnosti a ztráty sáláním. Tento výpočet je proveden taktéž.

Z výpočtů účinnosti jsem stanovil množství potřebného paliva. V závislosti na množství paliva jsem stanovil množství vzduchu. Z toho vycházel návrh ventilátoru a výpočet tlakových předloženého návrhu systému dohořívacích vzduchů. Jako poslední jsou uvedeny výpočty pro délkovou roztažnost a návrh izolace.

Pro výpočty byla užita literatura [1], [2], [10] a [11].

6.1 Prvkové složení paliva

V tabulce je uvedeno prvkové složení paliva podle dlouhodobého měření

Prvek	Obsah	+/-	Jednotka
W^a	0,29	0,06	%
A^a	15,54	0,14	%
A^d	15,59	0,14	%
Q_s^{daf}	35,503	0,12	MJ.kg^{-1}
Q_s^d	29,97	0,12	MJ.kg^{-1}
S_a	0,55	0,02	%
V^{daf}	25-27,5	0,17	%
N^d	1,125	0,18	%
C^d	74,581	0,46	%
H^d	4,195	0,08	%
O^d	3,872		%

Tab. 4 Parametry paliva ze dne 4.1.2011

Prvek	Obsah min	Obsah max	Jednotka
W^r	7	11	%
Q_i^r	24	27,5	MJ.kg^{-1}
A^d	10	22	%
S^d	0,6	max	%
V^{daf}	30	36	%

Tab. 5 Základní parametry paliva dlouhodobé

Pro další výpočty jsem volil hodnotu $W^r = 7\%$

Pro výpočet množství paliva a vzduch je třeba vstupní hodnoty přepočítat na hodnoty hrubého vzorku.

$$A^r = A^a \frac{(1 - W^r)}{(1 - W^a)} = 0,1554 \frac{(1 - 0,07)}{(1 - 0,0029)} = 0,1449 \approx 14,49\% \quad (10)$$

Pro kontrolní výpočet jsem zvolil přepočítání z analytického vzorku na suchý.

$$A^r = A^d (1 - W^r) \Rightarrow A^d = \frac{A^r}{1 - W^r} = \frac{0,1449}{1 - 0,07} = 0,1558 \approx 15,58\% \quad (11)$$

Dle zadání je hodnota $A^d = 15,59\% \pm 0,14\%$, proto můžeme výsledek kontroly považovat za dostatečně přesný.

Prvkový přepočítání na hrubý vzorek paliva

$$X^r = X^d (1 - W^r) \quad (12)$$

Ostatní výpočty dle rovnice (12)

$$C^r = C^d (1 - W^r) = 0,74581 (1 - 0,07) = 0,69360$$

$$N^r = N^d (1 - W^r) = 0,001125 (1 - 0,07) = 0,001046$$

$$H^r = H^d (1 - W^r) = 0,04195 (1 - 0,07) = 0,03901$$

$$O^r = O^d (1 - W^r) = 0,03872 (1 - 0,07) = 0,03601$$

$$S^r = S^a \left(\frac{1 - W^r}{1 - W^a} \right) = 0,0055 \frac{(1 - 0,07)}{(1 - 0,0029)} = 0,00513 \quad (13)$$

Prvek	Hodnota	Jednotka
N ^r	1,046	%
C ^r	69,360	%
H ^r	3,901	%
O ^r	3,601	%
S ^r	0,513	%

Tab. 6 Prvkové složení hrubého vzorku

Kontrolní výpočet prvků pro hořlaviny a pro obsah všech složek

$$A + h + W = 1 \approx 100\% \quad (14)$$

$$h = C + S + N + H + O \quad (15)$$

$$h = 69,360 + 0,513 + 1,046 + 3,901 + 3,601 = 78,421\%$$

Ověření předpokladu podle rovnice (14): $14,49 + 7 + 78,421 = 99,911\%$

Výsledek lze vzhledem k tolerancím u měřených hodnot prvků brát jako směrodatný pro další výpočty.

6.2 Stechiometrické výpočty

6.2.1 Stanovení stochiometrického množství vzduchu a spalin

Objem kyslíku

$$V_{O_2, \min} = 22,39 \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (16)$$

$$V_{O_2, \min} = 22,39 \left(\frac{0,69360}{12,01} + \frac{0,03901}{4,032} + \frac{0,00513}{32,06} - \frac{0,03601}{32} \right) = 1,488 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Objem vzduchu suchého

$$V_{VS, \min} = \frac{V_{O_2, \min}}{0,21} = \frac{1,488}{0,21} = 7,086 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (17)$$

Objem vzduchu vlhkého, relativní vlhkost vzduchu jsem stanovil $\phi = 70\%$, při teplotě 20°C . Součinitel respektující tuto korekci při těchto hodnotách relativní vlhkosti a teplotě $\chi_v = 1,016$

$$V_{VV, \min} = \chi_v \cdot V_{VS, \min} = 1,016 \cdot 7,086 = 7,2 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (18)$$

Objem vodních par

$$V_{H_2O}^V = (\chi_v - 1) V_{VS, \min} = (1,016 - 1) \cdot 7,086 = 0,113 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (19)$$

Přebytek spalovacího vzduchu volím 1,175

Objem skutečného vlhkého vzduchu

$$V_{VV} = V_{VV, \min} \cdot \alpha = 7,2 \cdot 1,175 = 8,46 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (20)$$

Objem CO_2 ve spalinách

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} C^r = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,69360 = 1,288 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (21)$$

Objem SO_2 ve spalinách

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} C^r = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,00513 = 0,00350 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (22)$$

Objem N_2 ve spalinách

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,014} N^r + V_{VS, \min} = \frac{22,4}{28,014} \cdot 0,01046 + 0,7086 = 5,539 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (23)$$

Objem Ar ve spalinách (do tohoto objemu jsou započítány i jiné vzácné plyny obsažené ve vzduchu)

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{VS, \min} = 0,0092 \cdot 7,086 = 0,065 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (24)$$

Objem H₂O ve spalínách

$$V_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} H^r + \frac{22,4}{18,016} W^r + V_{H_2O}^V = \frac{44,8}{4,032} 0,03901 + \frac{22,4}{18,016} 0,07 + 0,113 = 0,634 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (25)$$

Objem suchých spalin

$$V_{SS,\min} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar} = 1,288 + 0,0035 + 5,539 + 0,065 = 6,896 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (26)$$

Objem spalin vlhkých

$$V_{SV,\min} = V_{SS,\min} + V_{H_2O}^S = 6,896 + 0,113 = 7,529 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (27)$$

Objem spalin

$$V_{SV} = V_{SV,\min} + (\alpha - 1) V_{VV,\min} = 7,529 + (1,175 - 1) 7,2 = 8,789 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (28)$$

Přepočítání objemu spalin z podmínek normálních na podmínky provozu, tzn. tlak $p_s = -50 \text{ Pa}$, teplota $t_s = 150^\circ\text{C}$

$$V_{SV}^{ts,ps} = V_{SV} \cdot \frac{273 + t_s}{273} \cdot \frac{0,101325}{p_s} = 8,789 \cdot \frac{273 + 150}{273} \cdot \frac{0,101325}{0,101275} = 13,625 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (29)$$

6.2.2 Hustota vzduchu a spalin

Podle literatury [2] je hodnota hustoty vodní páry obsažená ve vzduchu $\rho_{H_2O} = 0,8058 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, hustota suchého vzduchu je $\rho_{VS} = 1,29279 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, pomocí těchto hodnot jsem schopen stanovit hustotu nasávaného vzduchu pro normální podmínky.

$$\rho_{VV} = \frac{V_{VS,\min} \cdot \rho_{VS} + (\chi_V - 1) V_{VS,\min} \cdot \rho_{H_2O}}{V_{VV,\min}} = \frac{7,086 \cdot 1,29279 \cdot (1,016 - 1) + 7,086 \cdot 0,8058}{7,2} = 1,259 \text{ kg} \cdot \text{Nm}^{-3} \quad (30)$$

Pro výpočet hustoty spalin je třeba znát hustoty jednotlivých složek spalin. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce. Do složek spalin je nutné započítat i vodní páry.

hustota prvku	Hodnota	Jednotka
ρ_{CO_2}	1,9768	$\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}$
ρ_{SO_2}	2,9262	$\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}$
ρ_{N_2}	1,25047	$\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}$
ρ_{Ar}	1,78385	$\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}$

Tab. 7 Hustoty prvků obsažených ve spalínách[2]

$$\rho_{SV,\min} = \frac{\sum V_i \cdot \rho_i}{V_{SV,\min}} \quad (31)$$

$$\rho_{SV,\min} = \frac{1,384.1,9768 + 0,0035.2,9262 + 5,539.1,25047 + 0,065.1,78385 + 0,113.0,8058}{7,625} = 1,287 \text{ kg.Nm}^{-3}$$

$$\rho_{SV} = \frac{V_{SV,\min} \cdot \rho_{SV,\min} + (\alpha - 1) V_{VV,\min} \cdot \rho_{VV}}{V_{SV,\min} + (\alpha - 1) V_{VV,\min}} \quad (32)$$

$$\rho_{SV} = \frac{7,529.1,29279 + (1,175 - 1).7,2.1,259}{7,529 + (1,175 - 1).7,2} = 1,287 \text{ kg.Nm}^{-3}$$

Přepočet hustoty spalin z podmínek normálních na podmínky provozu, tzn. tlak $p_s = -50 \text{ Pa}$, teplota $t_s = 150^\circ\text{C}$

$$\rho = \rho_{SV} \cdot \frac{273}{t_s + 273} \cdot \frac{p_s}{0,101325} = 1,287 \cdot \frac{273}{150 + 273} \cdot \frac{0,101275}{0,101325} = 0,83 \text{ kg.m}^{-3} \quad (33)$$

6.2.3 Entalpie vzduchu a spalin

Pro vzduch jsem volil měrnou entalpii z tabulky viz. příloha 1 pro hodnotu $i_{VS}^t = 32,57 \text{ kJ.Nm}^{-3}$ a $i_{H_2O}^t = 39,1 \text{ kJ.Nm}^{-3}$, pro teplotu vzduchu $t = 25^\circ\text{C}$.

$$I_{V,\min}^t = V_{VS} \cdot i_{VS}^t + V_{H_2O}^V \cdot i_{H_2O}^t = 7,086.32,57 + 0,113 + 39,1 = 235,231 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad (34)$$

Pro spaliny jsem volil měrnou entalpii jednotlivých složek spalin viz. příloha 1 pro teplotu $t = 150^\circ\text{C}$, poměrný úlet 0,8 a poměrné zachycení 0,2.

$$I_{S,\min}^t = \sum V_i \cdot i_i^t + a_u^r \cdot A^r \cdot i_{pop}^t \quad (35)$$

$$I_{S,\min}^t = 1,288.263,75 + 0,00350.292,65 + 5,539.194,7 + 0,065.139,535 + 0,6339.227,55 + 0,8.0,1449.125,2 = 1587,929 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Entalpie spalin o teplotě 150°C , které vzniknou spálením 1 kg paliva při přebytku vzduchu $\alpha = 1,175$, který je zadáný.

$$I_S^{t,\alpha} = I_{S,\min}^t + (\alpha - 1) I_{V,\min}^t = 235,231 + 1587,929 = 1629,094 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad (36)$$

6.3 Tepelná bilance kotle

6.3.1 Redukovaná výhřevnost

Pro výpočet ztrát kotle je třeba stanovit:

měrnou tepelnou kapacitu paliva

$$c_{pv} = 4,19.W^r + c_{su} \cdot (1 - W^r) \quad (37)$$

měrné teplo sušiny c_{su} je pro černé uhlí $1,00 \text{ kJ.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

$$c_{pv} = 4,19.0,07 + 1.(1 - 0,07) = 1,223 \text{ kJ.kg}^{-1} \text{K}^{-1}$$

fyzické teplo paliva (pro teplotu $t_{pv} = 20^\circ\text{C}$)

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv} = 1,223 \cdot 20 = 24,46 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad (38)$$

Hodnota spalného teplo paliva ze dne 4.1.2011 je známá pouze pro hořlavinu, k účelům výpočtu je nutné znát spalné teplo hrubého vzorku.

$$Q_s^r = Q_s^{daf} \cdot \frac{1 - W^r - A^r}{100} = 35503 \cdot (1 - 0,07 - 0,1449) = 27871,902 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad (39)$$

Výhřevnost hrubého vzorku

$$Q_i^r = Q_s^r - 2453 \cdot (W^r + 9 \cdot H^r) = 27871,902 - 2453 \cdot (0,07 + 9 \cdot 0,03901) = 26838,891 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad (40)$$

Pro kontrolu jsou zde uvedeny ještě empirické vzorce stanovení výhřevnosti paliva. Výhřevnost stanovujeme z prvkového.

Dulongův vzorec:

$$Q_i^r = 339 C^r + 1214 H^r - 151,8 O^r + 104,7 S^r - 24,5 W^r \quad (41)$$

$$Q_i^r = 339 \cdot 69,36 + 1214 \cdot 3,901 - 151,8 \cdot 3,601 + 104,7 \cdot 0,513 - 24,5 \cdot 7 = 27592,7 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

prvky jsou v [%]

Statistický vzorec:

$$Q_i^r = 347,5 C^r + 953 H^r - 109(O^r - S^r) - 2,5 W^r \quad (42)$$

$$Q_i^r = 347,5 \cdot 69,36 + 953 \cdot 3,901 - 109(3,601 - 0,513) - 2,5 \cdot 7 = 27309,1 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

prvky jsou v [%]

Mendělejevův vzorec

$$Q_i^r = 339 \cdot C^r + 1030 \cdot H^r - 109(O^r - S^r) - 24,5 W^r \quad (43)$$

$$Q_i^r = 339 \cdot 69,36 + 1030 \cdot 3,901 - 109(3,601 - 0,513) - 24,5 \cdot 7 = 26925,5 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

prvky jsou v [%]

Kontrola maximálního poměrného objemu tříatomových plynů

$$\varpi_{RO2\max} = \frac{21}{1 + \beta} \quad (44)$$

$$\beta = \frac{2,37 \cdot (H^r - 0,125 \cdot O^r)}{C^r + 0,375 \cdot S^r} = \frac{2,37 \cdot (3,901 - 0,125 \cdot 3,601)}{69,36 + 0,375 \cdot 0,513} = 0,118 \quad (45)$$

$$\varpi_{RO2\max} = \frac{21}{1 + 0,118} = 18,79$$

Tento poměrný objem vyhovuje pro černá uhlí, protože leží v intervalu hodnot 18,4 – 19%.

Redukovaná výhřevnost

$$Q_{ired} = Q_i^r + i_{pv} = 26838,891 + 24,46 = 26863,357 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad (46)$$

6.3.2 Ztráty kotle

Ztráta mechanickým nedopalem – popel, dle literatury [1] je podíl úletového popelu 14%, $Q_{ci} = 32\,600 \text{ kJ.kg}^{-1}$ za předpokladu, že spalitelné látky jsou tvořeny převážně uhlíkem.

$$Z_{ci} = \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot X_i \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot Q_{ci} \quad (47)$$

$$Z_{cu} = \frac{0,14}{1 - 0,14} \cdot 0,8 \cdot \frac{0,1449}{26863,357} \cdot 32600 = 0,02291 \cong 2,291\%$$

Ztráta mechanickým nedopalem- struska dle literatury [1] je podíl úletového popelu 22%, $Q_{ci} = 32\,600 \text{ kJ.kg}^{-1}$ za předpokladu, že spalitelné látky jsou tvořeny převážně uhlíkem.

$$Z_{cs} = \frac{0,22}{1 - 0,22} \cdot 0,2 \cdot \frac{0,1449}{26863,357} \cdot 32600 = 0,00991 \cong 0,992\% \quad (48)$$

Ztráta mechanickým nedopalem– celková

$$Z_{cc} = Z_{cu} + Z_{cs} = 2,291 + 0,992 = 3,283\% \quad (49)$$

Ztráta chemický nedopalem

maximální limit emisí CO 100 mg.Nm^{-3}

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot \text{mgCO} \cdot V_{SS,\min}}{(21 - O_{2ref}) \cdot Q_{ired}} = \frac{0,2116 \cdot 100 \cdot 6,896}{(21 - 6) \cdot 26863,357} = 0,00036 \cong 0,036\% \quad (50)$$

Ztráta citelným teplem spalin

Pro výpočet ztráty je třeba si stanovit přebytek vzduchu α_K za kotlem. Hodnoty $\Delta\alpha$ dle tabulek [2].

netěsnost	ohniště	2. tah	průtah	přehřívák	EKO	LUWO	MO	EO	kanál
$\Delta\alpha$	0,05	0,015	0,025	0,03	0,04	0,07	0,1	0,03	0,01

Tab. 8 Zvětšení součinitele přebytku vzduchu netěsnostmi [2]

$$\Delta\alpha = \sum \alpha = 0,37$$

$$\alpha_K = \alpha + \Delta\alpha = 1,175 + 0,37 = 1,545 \quad (51)$$

Entalpie vzduchu při tlaku 101325 Pa, teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 70%

$I_{vz} = 46,13 \text{ kJ.kg}^{-1}$ [9], entalpie spalín $I_s^{tk,ok} = 1716,129 \text{ kJ.kg}^{-1}$, pro $\alpha_K = 1,545$.

Hodnotu $I_s^{tk,ok}$ zjistím z grafu viz. příloha 9.

$$Z_k = (1 - Z_{cc}) \frac{I_s^{tk,ok} - \alpha_K \cdot I_{vz}}{Q_{ired}} = (1 - 0,03283) \cdot \frac{1716,129 - 1,545 \cdot 46,13}{26838,357} = 0,05922 \cong 5,922\% \quad (52)$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků – škvára, teplota $t_i = 600 \text{ °C}$, c_i viz. příloha 1.

$$Z_f = \frac{X_i}{1 - C_i} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot c_i \cdot t_i \quad (53)$$

$$Z_f = \frac{0,2}{1 - 0,22} \cdot \frac{0,1449}{26838,357} \cdot 0,9301 \cdot 600 = 0,00078 \cong 0,078\%$$

Ztráta sáláním do okolí

Tepelný výkon jmenovitý $Q_{vyr,j} = 80,1 \text{ MW}_t$, který odpovídá výrobě 100 t.hod^{-1} páry.

Tepelný výkon při nejčastějších výrobních hladinách kotle

výroba páry (t.h^{-1})	100	65	60	45	40
tepelný výkon (MW)	80,1	52,065	48,06	36,045	32,04

Tab. 9 Nejběžnější výrobní stavy kotle K3

$Z_{sv,j} = 0,00539$ dle nomogramu

Ztráta sáláním pro výkon 100 t.h^{-1}

$$Z_{sv100} = Z_{sv,j} \cdot \frac{Q_{vyr,j}}{Q_{vyr}} = 0,00539 \cdot \frac{80,1}{80,1} = 0,00539 \cong 0,539\% \quad (54)$$

Ztráta sáláním pro výkon 45 t.h^{-1} podle rovnice (54)

$$Z_{sv45} = Z_{sv,j} \cdot \frac{Q_{vyr,j}}{Q_{vyr}} = 0,00539 \cdot \frac{80,1}{36,045} = 0,0119 \cong 1,19\%$$

Celkové ztráty při výkonu 100 t.h^{-1}

$$Z_{100} = \sum Z_i = 3,283 + 0,036 + 5,922 + 0,078 + 0,593 = 9,912\% \quad (55)$$

Celkové ztráty při výkonu 45 t.h^{-1} podle rovnice (55)

$$Z_{45} = \sum Z_i = 3,283 + 0,036 + 5,922 + 0,078 + 1,19 = 10,517\%$$

6.3.3 Účinnost kotle

Účinnost při 100 t.h⁻¹

$$\eta_{100} = 100 - Z = 100 - 9,912 = 90,143\% \quad (56)$$

Účinnost při 45 t.h⁻¹ podle rovnice (56)

$$\eta_{45} = 100 - Z = 100 - 10,517 = 89,483\%$$

Podle technických parametrů v zadání se účinnost kotle pohybuje v rozmezí 88,5 – 86,5%. Podle výpočtu firmy PROTIS Ostrava, která zpracovávala teplotně-tepelný model pro kotel K3 se rozmezí účinnosti podle výkonu kotle pohybovalo mezi 91 – 90,3%. Z toho usuzuji, že mnou vypočítané hodnoty se dají považovat za směrodatné.

6.4 Výrobní teplo a množství paliva při maximálním a minimálním výkonu kotle

Entalpie	Označení	Hodnota	Jednotka
Ostrá pára	i_{pp}	3358	kJ.kg^{-1}
Napájecí voda	i_{nv}	444,5	kJ.kg^{-1}
Vstřikovací voda	i_v	444,5	kJ.kg^{-1}
Odluh	i_w	1244,93	kJ.kg^{-1}

Tab. 10 Entalpie páry a napájecí vody[10]

Pro výkon 100 t.h⁻¹ jsou hodnoty průtoků ostré páry, odluhu a vstřikovací vody:

Průtok	Označení	Hodnota	Jednotka
Ostrá pára	M_{pp}	27,8	kg.s^{-1}
Vstřikovací voda	M_v	2,28	kg.s^{-1}
Odluh	M_o	0,6	kg.s^{-1}

Tab. 11 Hotnoty průtoků při výkonu 100 t.h⁻¹

Výrobní teplo páry při výkonu 100 t.h⁻¹

$$Q_V = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_v \cdot (-i_{nv}) + M_o \cdot (i_w - i_{nv}) \quad (57)$$

$$Q_{V100} = 27,8 \cdot (3358 - 444,5) + 2,28 \cdot (-444,5) + 0,6 \cdot (1244,93 - 444,5) = 80462,1 \text{ kJ.s}^{-1}$$

Skutečné množství paliva přivedeného do kotle při výkonu 100 t.h⁻¹

$$M_{pal100} = \frac{Q_V}{Q_{ired} \cdot \eta_{100}} = \frac{80462,1}{26838,357 \cdot 0,90143} = 3,322 \text{ kg.s}^{-1} \quad (58)$$

Výpočtové množství spáleného paliva při výkonu 100 t.h⁻¹

$$M_{pv100} = M_{pal} \cdot (1 - Z_{CC}) = 3,322 \cdot (1 - 0,0328) = 3,213 \text{ kg.s}^{-1} \quad (59)$$

Pro výkon 45 t.h⁻¹ jsou hodnoty průtoků ostré páry, odluhu a vstřikovací vody:

Průtok	Označení	Hodnota	Jednotka
Ostrá pára	M _{pp}	12,5	kg.s ⁻¹
Vstřikovací voda	M _v	1,8	kg.s ⁻¹
Odluh	M _O	0,6	kg.s ⁻¹

Tab. 12 Hotnoty průtoků při výkonu 45 t.h⁻¹

Výrobní teplo páry při výkonu 45 t.h⁻¹ dle rovnice (57)

$$Q_{V45} = 12,5 \cdot (3358 - 444,5) + 1,8 \cdot (-444,5) + 0,6 \cdot (1244,93 - 444,5) = 36098,9 \text{ kJ.s}^{-1}$$

Skutečné množství paliva přivedeného do kotle při výkonu 45 t.h⁻¹ dle rovnice (58)

$$M_{pal45} = \frac{Q_V}{Q_{i,red} \cdot \eta_{45}} = \frac{36098,9}{26838,357 \cdot 0,89438} = 1,502 \text{ kg.s}^{-1}$$

Výpočtové množství spáleného paliva při výkonu 45 t.h⁻¹ dle rovnice (59)

$$M_{pv45} = M_{pal} \cdot (1 - Z_{CC}) = 1,502 \cdot (1 - 0,0328) = 1,501 \text{ kg.s}^{-1}$$

6.5 Výpočet množství vzduchu pro maximální a minimální výkon a odhad potřeby OFA vzduchu

Stanovení množství vzduchu pro spálení výpočtového množství paliva přivedeného do kotle při výkonu 100 t.h⁻¹.

$$O_{VZ100} = M_{pv100} \cdot V_{vv} = 3,213 \cdot 8,46 = 27,186 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cong 97870 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (60)$$

Pro potřeby OFA vzduchů do kotle je odebíráno cca 15% z celkového množství vzduchu.

$$O_{OFAcelkové100}^n = O_{VZ100} \cdot 0,15 = 27,186 \cdot 0,15 = 4,078 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cong 14680 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (61)$$

Stanovení množství vzduchu pro spálení výpočtového množství paliva přivedeného do kotle při výkonu 45 t.h⁻¹ dle rovnice (60)

$$O_{VZ45} = M_{pv45} \cdot V_{vv} = 1,501 \cdot 8,46 = 12,699 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cong 45716 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Pro potřeby OFA vzduchů do kotle je odebíráno cca 15% z celkového množství vzduchu dle rovnice (61)

$$O_{OFAcelkové45}^n = O_{VZ45} \cdot 0,15 = 12,699 \cdot 0,15 = 1,905 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cong 6858 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

V tabulce jsou uvedeny potřebné hodnoty vzduchu celkového a OFA vzduchů pro výkony kotel 100 t.h⁻¹ a 45 t.h⁻¹.

Výkon	Jednotka	Objemový průtok celkový	Objemový průtok OFA
100 t.h ⁻¹	Nm ³ .h ⁻¹	97 870	14 680
45 t.h ⁻¹	Nm ³ .h ⁻¹	45 716	6 858

Tab. 13 Objemový průtok vzduchu K3

6.5.1 Hrubá vzduchová bilance

Kromě množství celkového vzduchu a vzduchů dohořivacích je v tab. 12 uvedena hrubá vzduchová bilance, která je sestavená na základě:

- provozních měření
- stechiometrických výpočtů s přihlédnutím k dosahovaným hodnotám účinnosti

Vzduch	Jednotka	Výkon 100 t.h ⁻¹	Výkon 45 t.h ⁻¹
Celkový	Nm ³ .h ⁻¹	97 870	45 716
Do mlýnů	Nm ³ .h ⁻¹	26 000	13 000
Těsnící	Nm ³ .h ⁻¹	1 900	950
Sekundární	Nm ³ .h ⁻¹	43 690	16 508
OFA	Nm ³ .h ⁻¹	14 680	6 858
Chladicí BIO	Nm ³ .h ⁻¹	800	800
Chladicí olejový hořák	Nm ³ .h ⁻¹	3 600	3 600
Přísátý vzduch do SK	Nm ³ .h ⁻¹	7 200	4 000

Tab. 14 Hrubá vzduchová bilance

6.6 Návrh ventilátoru

Použití ventilátoru na zvýšení tlaku v systému vychází ze zkušeností na jednotlivých provozech, např.: Elektrárna Opole. Od tohoto řešení se očekává, že zvýšením tlaku dojde také ke zvýšení rychlosti vzduchu na ústí dýzy.

Návrh ventilátoru byl proveden specializovanou společností ZVVZ Milevsko podle zadání:

Parametr	Jednotka	Hodnota
Dopravní množství	$\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	1500 – 8000
Tlak media na sání ventilátoru	Pa	660 až 1200
Tlak na výstupu	Pa	2500 - minimálně
Teplota v místě odběru	$^{\circ}\text{C}$	263 – 321
Medium	-	Vzduch

Tab. 15 Zadávací parametry pro ventilátor

Návrh ventilátoru vychází z:

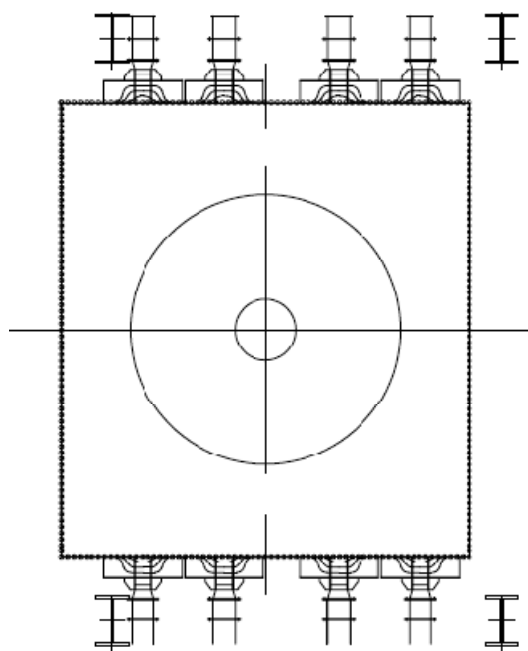
- dosahovaných parametrů teplot a tlaku na výstupu vzduchu z ohříváku
- stechiometrického výpočtu a vzduchové bilance

Nabídka včetně charakteristiky je uvedena v příloze 7.

6.7 Konstrukční návrh úprav systému dohořívaho vzduchu

Konstrukční návrh systému dohořívacího vzduchu vychází z:

- již realizovaných úprav na jiných provozech
- potřeb množství vzduchu OFA
- dispozičního uspořádání kotelny



Obr. 31 Návrh rozmístění dýz

Z hlediska dispozičních možností na kotelně, a to zejména omezením spádovým potrubím, jsem pro nový systém dohořivacích vzduchů zvolil 4 ks dýz na každé straně kotle. Původním řešením bylo osadit kotel více kusy dýz na každé straně, což nebylo možné. Schematicky je rozmístění znázorněno na obrázku 31.

6.7.1 Úprava systému

- odstranění dvou kusů regulačních klapek a měření průtoku
- instalaci dvou radiálních ventilátorů na podlaží +11,5 m na kotelně, včetně tkaninových kompenzátorů na sání i výtlačku
- nové kanály vzduchu
- instalaci nového měření na vodorovnou část kanálu, která bude mít stejné rozměry jako v současné době použitý hlavní kanál
- uložení ventilátoru na betonový základ, jak uvádí návrh firmy ZVVZ Milevsko

6.8 Ověření návrhu, výpočet tlakové ztráty rozvodu vzduchu

V kapitole je uveden výpočet tlakové ztráty mnou navrženým rozvodem vzduchu.

Níže uvedený výpočet je realizován na základě hodnot platných pro výkon kotle 100 t.h⁻¹ páry. Pro přehlednost jsem pracoval s průtoky vzduchu v jednotkách m³.s⁻¹ nebo Nm³.s⁻¹.

Přetlak před ventilátorem $p_{01} = 1160$ Pa, přetlak za ventilátorem $p_0 = 3500$ Pa, podtlak v kotli $p_k = -50$ Pa

Potřeba vzduchu pro jednu větev systému dohořivacích vzduchů

$$O_{OFA}^n = \frac{O_{VZ100}}{2} \cdot 0,15 = \frac{27,186}{2} \cdot 0,15 = 2,039 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (62)$$

Pro výpočet ztrát je třeba znát množství vzduchu v přepočítaném stavu ze stavu normálního. Teplota vzduchu $t = 290^\circ\text{C}$,

$$O_{OFA} = O_{OFA}^n \cdot \frac{t + 273}{273} \cdot \frac{0,101325}{p_0} = 2,039 \cdot \frac{290 + 273}{273} \cdot \frac{0,101325}{0,104825} = 4,065 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (63)$$

Hustota vzduchu za normálních podmínek $\rho = 1,2959 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, po přepočtení na podmínky provozu $t = 290^\circ\text{C}$.

$$\rho_{OFA} = \rho \cdot \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{p_0}{0,101325} = 1,2959 \cdot \frac{273}{273 + 200} \cdot \frac{0,104825}{0,101325} = 0,6501 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (64)$$

Kinematická viskozita vzduchu při $t = 290^\circ\text{C}$ a přetlaku 3500 Pa podle [11]

$$\nu = 5,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Rozměry obdélníkového vzduchového kanálu na výtlačku ventilátoru $a = 500 \text{ mm}$, $b = 400 \text{ mm}$

Průřez:

$$S = a \cdot b = 0,5 \cdot 0,4 = 0,2 \text{ m}^2 \quad (65)$$

Pro obdélníkové průřezy je třeba vypočítat tzv. ekvivalentní průměr potrubí, který používáme k dalším výpočtům.

$$d_{ekv} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 0,4}{0,5 + 0,4} = 0,4 \text{ m} \quad (66)$$

Rychlost proudění vzduchu v kanále

$$w = \frac{O_{OFA}}{S} = \frac{4,065}{0,2} = 20,32 \text{ m.s}^{-1} \quad (67)$$

Reynoldsovo číslo (68)

$$Re = \frac{w \cdot d_{ekv} \cdot \rho_{OFA}}{\nu} = \frac{20,32 \cdot 0,4 \cdot 1,205}{1,66 \cdot 10^{-5}} = 4,86 \cdot 10^5 \Rightarrow \text{jedná se o turbulentní proudění}$$

Ekvivalentní drsnost stěn vzduchovodů

$$\varepsilon = 0,18 \text{ mm}$$

Součinitel třecích ztrát pro kruhové potrubí

$$\lambda_0 = 0,28 \cdot \left[\frac{\log 5,5 \cdot d_{ekv}}{\varepsilon + 55 \cdot \frac{d_{ekv}}{Re}} \right]^{-2} = 0,28 \cdot \left[\frac{\log 5,5 \cdot 0,4}{0,18 + 55 \cdot \frac{0,4}{4,86 \cdot 10^5}} \right]^{-2} = 6,03 \cdot 10^{-2} \quad (69)$$

Korekce pro obdélníkový průřez potrubí

$$\lambda = C \cdot \lambda_0 \quad (70)$$

$$C = 1,1 - 0,1 \frac{b}{a} = 1,1 - 0,1 \cdot \frac{0,4}{0,5} = 1,02 \quad (71)$$

S využitím rovnice (71)

$$\lambda = 1,02 \cdot 6,03 \cdot 10^{-2} = 6,15 \cdot 10^{-2}$$

podmínka je $\frac{b}{a} \leq 1$

Délka hlavní větve potrubí od příruby ventilátoru po první odbočku k dýze

$$L_1 = 2,28 \text{ m}$$

Součinitelé místních ztrát ξ

$$\text{koleno pro } \frac{R}{D}=1 \quad \xi = 0,25$$

$$\text{celkem} \quad \Sigma \xi = 0,25$$

Tlaková ztráta na hlavní větvi před první odbočkou

$$\Delta p = \left(\lambda \cdot \frac{L}{d_{ekv}} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad (72)$$

$$\Delta p_1 = \left(6,03 \cdot 10^{-2} \frac{2,28}{0,4} + 0,25 \right) \frac{20,32^2}{2} \cdot 0,6501 = 76 \text{ Pa}$$

Statická hodnota přetlaku před první odbočkou

$$p_{s1} = p_o - \Delta p_1 = 3500 - 76 = 3424 \text{ Pa} \quad (73)$$

Celková hodnota přetlaku před první odbočkou

$$p_1 = p_{s1} + \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 3424 + \frac{20,32^2}{2} \cdot 0,6501 = 3558 \text{ Pa} \quad (74)$$

Délka hlavní větve potrubí od příruby ventilátoru po druhou odbočku k dýze

$$L_2 = 3,28 \text{ m}$$

Součinitelé místních ztrát ξ

$$\text{koleno pro } \frac{R}{D}=1 \quad \xi = 0,25$$

$$\text{zúžení } 1x \quad \xi = 0,1$$

$$\text{celkem} \quad \Sigma \xi = 0,35$$

Tlaková ztráta na hlavní větvi před druhou odbočkou dle (72)

$$\Delta p_2 = \left(6,03 \cdot 10^{-2} \frac{3,28}{0,4} + 0,35 \right) \frac{20,32^2}{2} \cdot 0,6501 = 108 \text{ Pa}$$

Statická hodnota přetlaku před druhou odbočkou dle (73)

$$p_{s2} = p_o - \Delta p_2 = 3500 - 108 = 3392 \text{ Pa}$$

Celková hodnota přetlaku před druhou odbočkou dle (74)

$$p_2 = p_{s2} + \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 3392 + \frac{20,32^2}{2} \cdot 0,6501 = 3526 \text{ Pa}$$

Délka hlavní větve potrubí od příruby ventilátoru po třetí odbočku k dýze

$$L_3 = 4,71 \text{ m}$$

Součinitelé místních ztrát ξ

$$\text{koleno pro } \frac{R}{D}=1 \quad \xi = 0,25$$

$$\text{zúžení } 2x \quad \xi = 0,1$$

$$\text{celkem} \quad \Sigma \xi = 0,45$$

Tlaková ztráta na hlavní větvi před třetí odbočkou dle (72)

$$\Delta p_3 = \left(6,03 \cdot 10^{-2} \frac{4,71}{0,4} + 0,55 \right) \frac{20,32^2}{2} \cdot 0,6501 = 148 \text{ Pa}$$

Statická hodnota přetlaku před třetí odbočkou dle (73)

$$p_{s3} = p_o - \Delta p_3 = 3500 - 148 = 3352 \text{ Pa}$$

Celková hodnota přetlaku před třetí odbočkou dle (74)

$$p_3 = p_{s3} + \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 3352 + \frac{20,32^2}{2} \cdot 0,6501 = 3486 \text{ Pa}$$

Délka hlavní větve potrubí od příruby ventilátoru po čtvrtou odbočku k dýze

$$L_4 = 5,187 \text{ m}$$

Součinitelé místních ztrát ξ

$$\text{koleno pro } \frac{R}{D}=1 \quad \xi = 0,25$$

$$\text{zúžení } 3x \quad \xi = 0,1$$

$$\text{celkem} \quad \Sigma \xi = 0,55$$

Tlaková ztráta na hlavní větvi před čtvrtou odbočkou dle (72)

$$\Delta p_4 = \left(6,03 \cdot 10^{-2} \frac{5,187}{0,4} + 0,55 \right) \frac{20,32^2}{2} \cdot 0,6501 = 170 \text{ Pa}$$

Statická hodnota přetlaku před čtvrtou odbočkou dle (73)

$$p_{s4} = p_o - \Delta p_4 = 3500 - 170 = 3330 \text{ Pa}$$

Celková hodnota přetlaku před čtvrtou odbočkou dle (74)

$$p_4 = p_{s4} + \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 3330,72 + \frac{20,32^2}{2} \cdot 0,6501 = 3464 \text{ Pa}$$

Výpočet tlakových ztrát jednotlivých přívodů k ústím OFA vzduchů

Průměry přívodů

d = 260 mm, redukce na 200 mm

Objemový průtok jednotlivými přívody

$$O_o = \frac{O_{OFA}}{4} = \frac{4,065}{4} = 1,016 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (75)$$

Plocha kruhového průřezu

$$S_o = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,26^2}{4} = 0,053 \text{ m}^2 \quad (76)$$

Rychlost proudění

$$w_o = \frac{O_o}{S_o} = \frac{1,016}{0,053} = 19,14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (76)$$

Reynoldsovo číslo dle rovnice (68)

$$\text{Re}_o = \frac{w_o \cdot d}{\nu} = \frac{19,14 \cdot 0,26}{5,46 \cdot 10^{-5}} = 9,12 \cdot 10^4$$

Součinitel třecích ztrát dle rovnice (69)

$$\lambda_0 = 0,28 \cdot \left[\frac{\log 5,5 \cdot d}{\varepsilon + 55 \cdot \frac{d}{\text{Re}_o}} \right]^{-2} = 0,28 \cdot \left[\frac{\log 5,5 \cdot 0,26}{0,18 + 55 \cdot \frac{0,26}{9,12 \cdot 10^4}} \right]^{-2} = 0,377$$

Čtvrtý přívod vzduchu OFA do kotle

Délka

$$l_4 = 1,65 \text{ m}$$

Součinitel místních ztrát

$$\text{přechod} \quad \xi = 1,2$$

$$\text{zúžení} \quad \xi = 0,1$$

$$\text{celkem} \quad \Sigma \xi = 1,3$$

Tlaková ztráta dle (72)

$$\Delta p_{o4} = \left(0,377 \cdot \frac{1,65}{0,26} + 1,3 \right) \frac{19,14^2}{2} \cdot 0,6501 = 439 \text{ Pa}$$

Tlak na ústí do kotle

$$p_{o4} = p_4 - \left(\frac{w_o^2}{2} \rho + \Delta p_{o4} \right) = 3464 - \left(\frac{19,14^2}{2} \cdot 0,6501 + 439 \right) = 2906 \text{ Pa} \quad (77)$$

Výstupní rychlost v kotli

$$w_U = \sqrt{\frac{2 \cdot \left(p_{ox} + \frac{w_o^2}{2} \rho - p_K \right)}{\rho}} \quad (78)$$

$$w_{U4} = \sqrt{\frac{2 \cdot \left(2906 + \frac{19,14^2}{2} \cdot 0,6501 - 50 \right)}{0,6501}} = 95,7 \, m.s^{-1}$$

Třetí přívod vzduchu OFA do kotle

Délka

$$l_3 = 1,56 \, m$$

Součinitel místních ztrát

přechod	$\xi = 1,2$
zúžení	$\xi = 0,1$
clonka	$\xi = 0,315$
celkem	$\Sigma \xi = 1,615$

Tlaková ztráta dle (72)

$$\Delta p_{O3} = \left(0,376 \cdot \frac{1,56}{0,26} + 1,615 \right) \frac{19,14^2}{2} \cdot 0,6501 = 461 \, Pa$$

Tlak na ústí do kotle dle (77)

$$p_{O3} = p_3 - \left(\frac{w_o^2}{2} \rho + \Delta p_{O3} \right) = 3558 - \left(\frac{19,14^2}{2} \cdot 0,6501 + 461 \right) = 2906 \, Pa$$

Výstupní rychlost v kotli dle (78)

$$w_{U3} = \sqrt{\frac{2 \cdot \left(2906 + \frac{19,14^2}{2} \cdot 0,6501 - 50 \right)}{0,6501}} = 95,6 \, m.s^{-1}$$

Druhý přívod vzduchu OFA do kotle

Délka

$$l_2 = 1,53 \, m$$

Součinitel místních ztrát

přechod	$\xi = 1,2$
---------	-------------

zúžení	$\xi = 0,1$
clonka	$\xi = 0,694$
celkem	$\Sigma \xi = 1,994$

Tlaková ztráta dle (72)

$$\Delta p_{o2} = \left(0,377 \cdot \frac{1,53}{0,26} + 1,994 \right) \frac{19,14^2}{2} \cdot 0,6501 = 501 \text{ Pa}$$

Tlak na ústí do kotle dle (77)

$$p_{o2} = p_2 - \left(\frac{w_o^2}{2} \rho + \Delta p_{o2} \right) = 3526 - \left(\frac{19,14^2}{2} \cdot 0,6501 + 501 \right) = 2906 \text{ Pa}$$

Výstupní rychlost v kotli dle (78)

$$w_{U2} = \sqrt{\frac{2 \cdot \left(2906 + \frac{19,14^2}{2} \cdot 0,6501 - 50 \right)}{0,6501}} = 95,6 \text{ m.s}^{-1}$$

První přívod vzduchu OFA do kotle

Délka

$$l_1 = 1,47 \text{ m}$$

Součinitel místních ztrát

přechod	$\xi = 1,2$
zúžení	$\xi = 0,1$
clonka	$\xi = 1,05$
celkem	$\Sigma \xi = 2,35$

Tlaková ztráta dle (72)

$$\Delta p_{o1} = \left(0,377 \cdot \frac{1,47}{0,26} + 2,35 \right) \frac{19,14^2}{2} \cdot 0,6501 = 533 \text{ Pa}$$

Tlak na ústí do kotle dle (77)

$$p_{o1} = p_1 - \left(\frac{w_o^2}{2} \rho + \Delta p_{o1} \right) = 3486 - \left(\frac{19,14^2}{2} \cdot 0,6501 + 533 \right) = 2906 \text{ Pa}$$

Výstupní rychlost v kotli dle (78)

$$w_{U1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \left(2906 + \frac{19,14^2}{2} \cdot 0,6501 - 50 \right)}{0,6501}} = 95,6 \text{ m.s}^{-1}$$

Výpočet je sestaven pro potřebu vzduchu se zvýšeným tlakem pomocí ventilátoru, při výkonu kotle 100 t.h⁻¹. Všechny směrodatné hodnoty jsou uvedeny v tabulce. Rovněž jsou v tabulce uvedeny směrodatné hodnoty pro výkon 45 t.h⁻¹, výpočet pro tuto hodnotu není uveden, protože metoda výpočtu je totožná.

Veličina	Jednotka	Výkon 100 t.h ⁻¹	Výkon 45 t.h ⁻¹
Přetlak na sání p ₀₁	Pa	1160	800
Přetlak na výtlaku p ₀	Pa	3500	3100
O ⁿ _{OFA}	Nm ³ .h ⁻¹	2,039	0,952
O _{OFA}	m ³ .h ⁻¹	4,065	1,898
Rychlost proudění v kanále v	m.s ⁻¹	20,32	9,5
Rychlost proudění v dýze v _D	m.s ⁻¹	19,14	8,9
Tlak na ústí dýzy p _U	Pa	2906	2810
Výstupní rychlost v kotli w _U	m.s ⁻¹	95,6	92,6

Tab. 16 Hodnoty průtoku a rychlosti vzduchu K3 – varianta s ventilátorem

Pro srovnání ještě uvádím variantu, kdy do nového systému vzduchu není instalován posilovací ventilátor, ale trasy jsou konstruovány totožně. Pro úplné srovnání je zde zjednodušeně uvedena i výstupní rychlost při současných trasách.

Veličina	Jednotka	Výkon 100 t.h ⁻¹	Výkon 45 t.h ⁻¹
Přetlak p ₀	Pa	1160	800
O ⁿ _{OFA}	Nm ³ .h ⁻¹	2,039	0,952
O _{OFA}	m ³ .h ⁻¹	4,065	1,898
Rychlost proudění v kanále v	m.s ⁻¹	20,32	9,5
Rychlost proudění v dýze v _D	m.s ⁻¹	19,14	8,9
Tlak na ústí dýzy p _U	Pa	566	570
Výstupní rychlost v kotli w _U	m.s ⁻¹	40,8	40,9
Rychlost na ústí dýzy- současný stav	m.s ⁻¹	61,8	48,9

Tab. 17 Hodnoty průtoku a rychlosti vzduchu K3 – varianta bez ventilátoru a stávající stav

6.9 Délková roztažnost potrubí

Jelikož vzduch, proudící kanálem dosahuje teploty 290°C a teplota na kotelně je při odstaveném kotli 20°C, dojde při najetí kotle k jisté délkové dilataci způsobené změnou teploty kovu, kterým je kanál tvořen. Z tohoto důvodu je nutné tuto změnu délky kompenzovat vhodným kompenzátorem. Dalším důvodem použití kompenzátoru je, že bude dilatovat i kotel ze stejného důvodu jako kanály a tj. rozdílem teplot za stavu mimo provoz a v provozu.

Dilataci budu řešit tkaninovými kompenzátory po konzultaci s dodavatelem ventilátorů.

6.9.1 Výpočet délkové roztažnosti jednotlivých částí kanálu

Součinitel délkové roztažnosti

$$\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Rozdíl teplot

$$\Delta t = 270^\circ \text{C}$$

Vzorec pro výpočet délkové roztažnosti

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta t \cdot L_i \quad (79)$$

Prodloužení svislé části výstupního kanálu dle (79)

$$L_s = 1,5 \text{ m}$$

$$\Delta l_s = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 270 \cdot 1,5 = 4,86 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Prodloužení vodorovné části výstupního kanálu dle (79)

$$L_v = 3,69 \text{ m}$$

$$\Delta l_v = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 270 \cdot 3,69 = 0,012 \text{ m}$$

Prodloužení prvního přívodu OFA dle (79)

$$L_1 = 1,47 \text{ m}$$

$$\Delta l_1 = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 270 \cdot 1,47 = 4,76 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Prodloužení druhého přívodu OFA dle (79)

$$L_2 = 1,53 \text{ m}$$

$$\Delta l_2 = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 180 \cdot 1,53 = 4,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Prodloužení třetího přívodu OFA dle (79)

$$L_3 = 1,56 \text{ m}$$

$$\Delta l_3 = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 180 \cdot 1,56 = 5,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Prodloužení čtvrtého přívodu OFA dle (79)

$$L_4 = 1,65 \text{ m}$$

$$\Delta l_4 = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 270 \cdot 1,65 = 5,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

6.10 Izolace potrubí

Z důvodů omezení tepelných ztrát proudícího vzduchu, který má teplotu 290°C, je nutné potrubí řádně izolovat.

Pro výpočet tloušťky izolace jsem použil software od firmy ISOVER IsoCal. Výpočtovým kritériem byla maximální teplota 40°C na povrchu plechu, který kryje izolaci. Výsledky tloušťky izolace na jednotlivých částech rozvodu vzduchu jsou v rozmezí 100 až 120 mm. Pro montáž volím tloušťku izolace 120 mm. Použitá izolace Fire Protect 150F – ISOVER. Veškeré podklady jsou uvedeny v příloze 8.

6.11 Odhad nákladů

Položka	Cena Kč bez DPH
Inženýring	500 000
Projekt KKS	50 000
Demontáže	50 000
Strojní dodávky	
- Ventilátory	620 000
- Dýzy	500 000
- Kanály	500 000
- Kompenzátory	120 000
- Izolace	50 000
- Oplechování	40 000
Montáž strojní části	500 000
Dodávky elektro MaR	150 000
Seřízení kotle	250 000
Dodavatelská dokumentace	50 000
CELKEM	3 380 000

Tab. 18 Odhad nákladů

ZÁVĚR

Diplomová práce měla za cíl návrh úprav stávajícího systému dohořivacích vzduchu práškového granulačního kotle K3 provozovaného v Teplárně Olomouc. Podnět pro úvahy o úpravách systému dohořivacích vzduchů daly již provozní zkoušky z roku 2012. Pro zjištění účinnosti současného systému, bylo provedeno měření teplotních polí a koncentračních polí O_2 , CO a NO_x .

Z dosavadních úvah a zkušeností vyplývá, že aplikace jiných primárních nebo sekundárních opatření bez vyřešení otázky dohořivacích vzduchů by se mýjela účinkem. Naopak dochází v některých ohledech ke zhoršení stavu.

Měřením teplot a koncentrací plynů, ze dne 28.3.2015 se potvrdily dva předpoklady.

Z pohledu rozložení teplot lze tvrdit, že výšková úroveň +16,56 m je jedním z vhodných míst pro umístění vstřikovacích trysek technologie SNCR.

Z pohledu koncentrací plynů O_2 , CO a NO_x lze tvrdit, že vykrytí spalovací komory vzduchem není dostatečné. To se projevuje při úpravě spalování, kdy dosahujeme nižších emisí NO_x , ale redukce CO je naprosto nedostačující.

V rámci diplomové práce jsem navrhnul systém dohořivacích vzduchů s použitím posilovacích ventilátorů. Z níže uvedené tabulky jsou patrné rozdíly pro varianty uspořádání uvažovaných systémů dohořivacích vzduchů.

Varianta	Rychlost vzduchu na vstupu do kotle $m.s^{-1}$	
	$100 t.h^{-1}$	$45 t.h^{-1}$
Současný stav	61	48,9
Návrh s posilovacím ventilátorem	95,1	92,6
Návrh bez posilovacího ventilátoru	40,8	37

Pokud si jako směrodatné kritérium zvolím rychlost vzduchu na vstupu do kotle, jednoznačně nejvhodnější variantou je použití posilovacího ventilátoru. Naopak sestava bez posilovacího ventilátoru by současný stav pravděpodobně nezlepšila.

Správnost navrženého řešení a nutnost užití posilovacího ventilátoru by bylo vhodné ověřit metodou CFD modelování s využitím naměřených hodnot jako vstupních parametrů do výpočtu. Realizované měření je možné využít i pro další úvahy o celkové koncepci řešení denitrifikace kotle K3.

Celkové náklady na rekonstrukci dohořivacích vzduchů s posilovacími ventilátory odhaduji na 3,38 milionu korun.

LITERATURA

- [1] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1997. ISBN 80-707-8681-7
- [2] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, 212 s. ISBN 978-80-01-03757-7
- [3] Oxidy dusíku (NO_x/NO₂). *Integrovaný registr znečišťování* [online]. 2009 [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://www.jmsec.com/cm/Applications/Coal-Fired-Power-Plants.html>
- [4] Doc. Ing. Josef Vejvoda. Návod a skripta. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze*. [online]. 2002 [cit. 2015-02-06]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/uchop/udalosti/skrinavo.html>
- [5] Mletí – stanovení sypkých parametrů. *Masarykova střední škola chemická* [online]. 2002 [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: http://www.mssch.cz/sites/default/files/_uzivatele/valentova/Mleti09.pdf
- [6] Oxidy dusíka vznikajícíce při spalování dřevní hmoty. *Tzbportal.sk* [online]. 2010 [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://www.tzbportal.sk/node/876/devel>
- [7] CoalFiredPowerPlants. *Johnson Matthey Stationary Emissions Control* [online]. 2014 [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://www.jmsec.com/cm/Applications/Coal-Fired-Power-Plants.html>
- [8] SCR (Selective Catalytic Reduction). *Autolexicon.net* [online]. 2007 [cit. 2015-02-27]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/scr-selective-catalytic-reduction/>
- [9] VÝPOČET VLASTNOSTÍ VLHKÉHO VZDUCHU. *Technika prostředí* [online]. 2006 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://www.qpro.cz/Vlastnosti-vlhkeho-vzduchu>
- [10] KADLEC, Zdeněk. *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisy*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 2009. ISBN 978-80-7385-061-6
- [11] Výpočet měrné hmotnosti a kinematické viskozity vzduchu. *E-learningové prvky pro podporu výuky odborných a technických předmětů* [online]. 2010 [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.elearn.vsb.cz%2Farchived%2FFS%2FMT%2F3-Programy%2520k%2520textu%2FVypocet%2520merne%2520hmotnosti%2520a%2520kinematicke%2520viskozity%2520vzduchu.xls&ei=9JkJVYDSMITeU9HdguAK&usg=AFQjCNFZMsAkutUCCzmCf5HP5qx9AX5IFg&sig2=KEKuq-2Pk8_ud0WnyoMqow&bvm=bv.88198703,d.d24&cad=rja

- [12] HUB, František, Jaroslav VESELSKÝ a Jaromír KRUŽÍK. *Moravskoslezské teplárny: 100 let služeb veřejnosti*. Ostrava: Moravskoslezské teplárny, 1998, 110 s. ISBN 80-238-2293-4.
- [13] Dalkia - tiskové zprávy: Teplárna Olomouc slaví 60 let. DALKIA ČESKÁ REPUBLIKA. *Teplárna Olomouc slaví 60 let* [online]. Ostrava, 04.04.2012 [cit. 2015-02-23]. Dostupné z: <http://www.dalkia.cz/cz/teplarna-olomouc-slavi-60-let>
- [14] USE OF CFD MODELING TO GUIDE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF OVERFIRE AIR FOR NOX CONTROL IN COAL-FIRED BOILERS. In: *BAIDU* [online]. 2002 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://wenku.baidu.com/view/ba515cd4360cba1aa811da24.html>
- [15] O nejlepších dostupných technikách (BAT). *Cenia - Resort životního prostředí* [online]. 2002 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: [http://www.cenia.cz/_C12571B20041E945.nsf/\\$pid/MZPMSFGRI2L4](http://www.cenia.cz/_C12571B20041E945.nsf/$pid/MZPMSFGRI2L4)

Seznam příloh

PŘÍLOHA 1: Tabulka měrných entalpií některých složek spalín

PŘÍLOHA 2: Měřicí místa na kotli K3 ze dne 28.3.2015

PŘÍLOHA 3: Naměřené teploty při výkonu 48 t.hod^{-1} páry

PŘÍLOHA 4: Naměřené koncentrace plynů O_2 , CO a NO_x
při výkonu 48 t.hod^{-1} páry

PŘÍLOHA 5: Naměřené teploty při výkonu 75 t.hod^{-1} páry

PŘÍLOHA 6: Naměřené koncentrace plynů O_2 , CO a NO_x
při výkonu 75 t.hod^{-1} páry

PŘÍLOHA 7: Návrh ventilátoru firmy ZVVZ Milevsko

PŘÍLOHA 8: Návrh izolace kanálů

PŘÍLOHA 9: Graf a tabulka I-t spalín

PŘÍLOHA 10: Fotografie z měření ze dne 28.3.2015

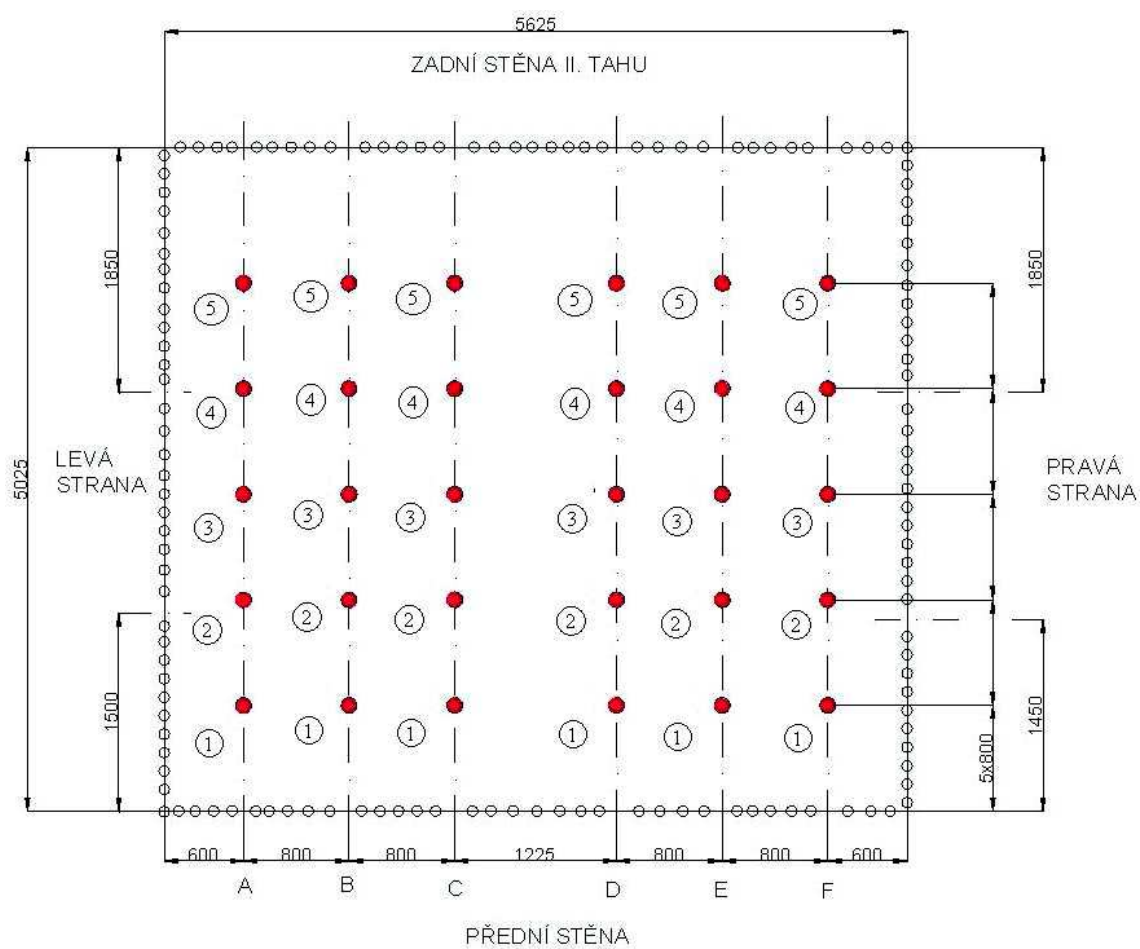
PŘÍLOHA 11: Výkres sestavy vzduchů

PŘÍLOHA 12: Výkres dýzy

PŘÍLOHA 1: Tabulka měrných entalpií některých složek spalin

t	CO ₂	SO ₂	N ₂	Ar	H ₂ O	vzduch suchý	CO	O ₂	popílek
°C	kJ.Nm ⁻³	kJ.Nm ⁻³	kJ.Nm ⁻³	kJ.Nm ⁻³	kJ.Nm ⁻³	kJ.Nm ⁻³	kJ.Nm ⁻³	kJ.Nm ⁻³	kJ.Nm ⁻³
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	41,62	46,81	32,53	23,32	39,1	32,57	32,49	32,78	20,2
100	170	189	130	93	150	132,3	132,2	132	80,8
200	357	392	260	186	304	266,2	261,4	267	169
300	559	610	392	278	463	402,5	395	407	264
400	772	836	527	372	626	541,7	531,7	551	360
500	994	1070	666	465	795	684,1	671,6	699	453
600	1225	1310	804	557	969	829,6	814,3	850	560
700	1462	1550	948	650	1149	978,1	960,4	1004	662
800	1705	1800	1094	743	1334	1129	1109	1160	767
900	1952	2050	1242	834	1526	1283	1260	1318	874
1000	2204	2305	1392	928	1723	1439	1313	1477	984
1100	2540	2540	1544	1020	1925	1597	1567	1638	1106
1200	2724	2803	1701,6	1112,8	2145,4	1756	1723	1802	1240
1300	2976	3063	1853	1207	2148	1916	1881	1965	1386
1400	3239	3323	2009	1300	2559	2077	2040	2129	1543
1500	3503	3587	2166	1390	2779	2240	2199	2294	1758
1600	3769	3838	2325	1577	3002	2403	2359	2465	2061
1800	4305	4363	2643	1742	3458	2732	2682	2804	2381
2000	4844	4890	2965	1855	3926	3065	2008	3136	2512
2500	6203	6200	3779	2320	5132	3909	2830	4007	

PŘÍLOHA 2: Měřicí místa na kotli K3 ze dne 28.3.2015



PŘÍLOHA 3: Naměřené teploty při výkonu 48 t.hod⁻¹ páry

Zleva

Pozice A čelní strana		
Čas	14:57	
Měřicí bod	Teplota [°C]	
	Od	Do
1	787	838
2	850	880
3	840	880
4	860	910
5	865	885

Zprava

Pozice F čelní strana		
Čas	15:16	
Měřicí bod	Teplota [°C]	
	Od	Do
1	770	775
2	935	945
3	960	970
4	965	975
5	945	970

Pozice B čelní strana		
Čas	15:02	
Měřicí bod	Teplota [°C]	
	Od	Do
1	918	938
2	930	945
3	935	945
4	940	960
5	900	955

Pozice E čelní strana		
Čas	15:12	
Měřicí bod	Teplota [°C]	
	Od	Do
1	935	950
2	965	975
3	965	975
4	970	975
5	985	995

Pozice C čelní strana		
Čas	15:05	
Měřicí bod	Teplota [°C]	
	Od	Do
1		
2		
3	935	955
4	950	965
5	965	970

Pozice D čelní strana		
Čas	15:09	
Měřicí bod	Teplota [°C]	
	Od	Do
1	940	960
2	960	980
3	975	985
4	975	980
5	980	990

PŘÍLOHA 4: Naměřené koncentrace plynů O₂, CO a NO_x při výkonu 48 t.hod⁻¹ páry

Zprava

Pozice F čelní strana kotle			
Čas	15:40		
Měřicí bod			
	O ₂	CO	NO
1	9,1	23	217
2	2,4	27	353
3	1,6	28	358
4	1,2	43	354
5	0,7	53	367

Zleva

Pozice A čelní strana kotle			
Čas	16:05		
Měřicí bod			
	O ₂	CO	NO
1	1,7	322	308
2	0,9	219	333
3	1,1	102	322
4	0,7	72	323
5	1,3	61	320

Pozice E čelní strana kotle			
Čas	15:45		
Měřicí bod			
	O ₂	CO	NO
1	2,6	25	317
2	1,1	36	351
3	0,9	42	338
4	0,8	46	324
5	0,6	66	338

Pozice B čelní strana kotle			
Čas	16:00		
Měřicí bod			
	O ₂	CO	NO
1	0,9	126	347
2	0,9	193	325
3	0,9	63	335
4	1,2	48	314
5	1,2	54	308

Pozice D čelní strana kotle			
Čas	15:50		
Měřicí bod			
	O ₂	CO	NO
1	1,9	32	330
2	0,9	32	353
3	0,5	46	333
4	0,6	45	302
5	0,6	44	327

Pozice C čelní strana kotle			
Čas	15:55		
Měřicí bod			
	O ₂	CO	NO
1	Pyrofast		
2			
3			
4			
5			

Uvedené výsledky jsou v [ppm] pro CO, NO_x a v [%obj.] pro O₂

PŘÍLOHA 5: Naměřené teploty při výkonu 75 t.hod⁻¹ páry

Zprava

Pozice F čelní strana		
Čas	17:25	
Měřicí bod	Teplota [°C]	
	Od	Do
1	845	905
2	935	965
3	990	1010
4	1005	1020
5	1005	1015

Zleva

Pozice A čelní strana		
Čas	17:46	
Měřicí bod	Teplota [°C]	
	Od	Do
1	950	970
2	965	975
3	980	990
4	985	995
5	990	1000

Pozice E čelní strana		
Čas	17:31	
Měřicí bod	Teplota [°C]	
	Od	Do
1	900	915
2	930	980
3	1020	1035
4	1045	1055
5	1040	1050

Pozice B čelní strana		
Čas	17:43	
Měřicí bod	Teplota [°C]	
	Od	Do
1	985	995
2	1000	1015
3	995	1005
4	1000	1010
5	1020	1030

Pozice D čelní strana		
Čas	17:35	
Měřicí bod	Teplota [°C]	
	Od	Do
1	935	950
2	985	1005
3	1010	1025
4	1020	1040
5	1035	1050

Pozice C čelní strana		
Čas	17:40	
Měřicí bod	Teplota [°C]	
	Od	Do
1		
2		
3	1015	1025
4	1045	1060
5	1045	1055

PŘÍLOHA 6: Naměřené koncentrace plynů O₂, CO a NO_x při výkonu 75 t.hod⁻¹ páry

Zleva

Pozice A čelní strana kotle			
Čas	16:45		
Měřicí bod			
	O ₂	CO	NO
1	0,7	591	313
2	0,6	1614	313
3	0,6	972	313
4	0,9	609	300
5	1,5	351	288

Zprava

Pozice F čelní strana kotle			
Čas	17:10		
Měřicí bod			
	O ₂	CO	NO
1	5,2	49	251
2	1,7	59	324
3	0,9	100	371
4	1,1	95	362
5	0,5	140	406

Pozice B čelní strana kotle			
Čas	16:47		
Měřicí bod			
	O ₂	CO	NO
1	0,2	912	315
2	0,8	470	293
3	1,8	231	283
4	2,4	244	278
5	2	480	291

Pozice E čelní strana kotle			
Čas	17:05		
Měřicí bod			
	O ₂	CO	NO
1	1,4	40	319
2	1,4	50	319
3	1,4	52	315
4	1,2	103	339
5	0,9	581	380

Pozice C čelní strana kotle			
Čas	16:55		
Měřicí bod			
	O ₂	CO	NO
1	Pyrofast		
2			
3			
4			
5			

Pozice D čelní strana kotle			
Čas	16:55		
Měřicí bod			
	O ₂	CO	NO
1	0,7	247	284
2	1,2	163	271
3	2,1	77	264
4	2,8	65	258
5	3	68	294

Uvedené výsledky jsou v [ppm] pro CO, NO_x a v [%obj.] pro O₂

PŘÍLOHA 7: Návrh ventilátoru firmy ZVVZ Milevsko

ZVVZ MACHINERY, a.s.

Sažínova 888

399 25 Milevsko

Česká republika

Naše značka: NQ 15 0052

Vyřizuje: **Pípek Martin**

Tel.: 382 55 2826,

Mob : 737 232 969,

e-mail: martin.pipek@zvvz.cz

V Milevsku 11. 3. 2015

Věc: Nabídka č. NQ 15 0052 (uvádějte ve styku s námi)

1. Technická část nabídky.

1.1. Všeobecně.

Pro zadané parametry Vám nabízíme středotlaké ventilátory typ RSB 630. Ventilátory jsou nabízeny s regulačním ústrojím.

1.2. Základní popis zařízení.

Ventilátory radiální středotlaké RSB 630 používají jako průmyslové, v elektrárnách, teplárnách, cementárnách, vápenkách, kamenolomech, filtračních zařízeních a všude tam, kde vyhovují svými parametry a provedením.

Provedení

Ventilátory se vyrábí ve velikostech D = 400 až 1250, jsou poháněny elektromotory přímo nebo přes pružnou spojku a mají s elektromotorem společný základový rám.

Uspořádání na přímo má oběžné kolo nasazeno přímo na čepu elektromotoru, u uspořádání na spojku je oběžné kolo nasazeno na hřídeli ventilátoru, který je s elektromotorem spojen pružnou spojkou.

Ventilátory se vyrábí v normálním provedení (čistá vzdušina bez abrazivních přímísenin), v uspořádání přes spojku se vyrábějí i v pancéřovaném provedení, které má zesílené oběžné kolo a spirální skříň je zesílena výměnitelnou vložkou. Do jedné spirální skříně lze použít 8 různých velikostí oběžných kol podle požadovaných výkonových parametrů. Podle polohy spirální skříně se vyrábí ventilátory pravotočivé nebo levotočivé.

K ventilátorům velikostí 630 až 1250 je možno dodat osový regulační ústrojí (příslušenství) pro umístění na sání ventilátoru.

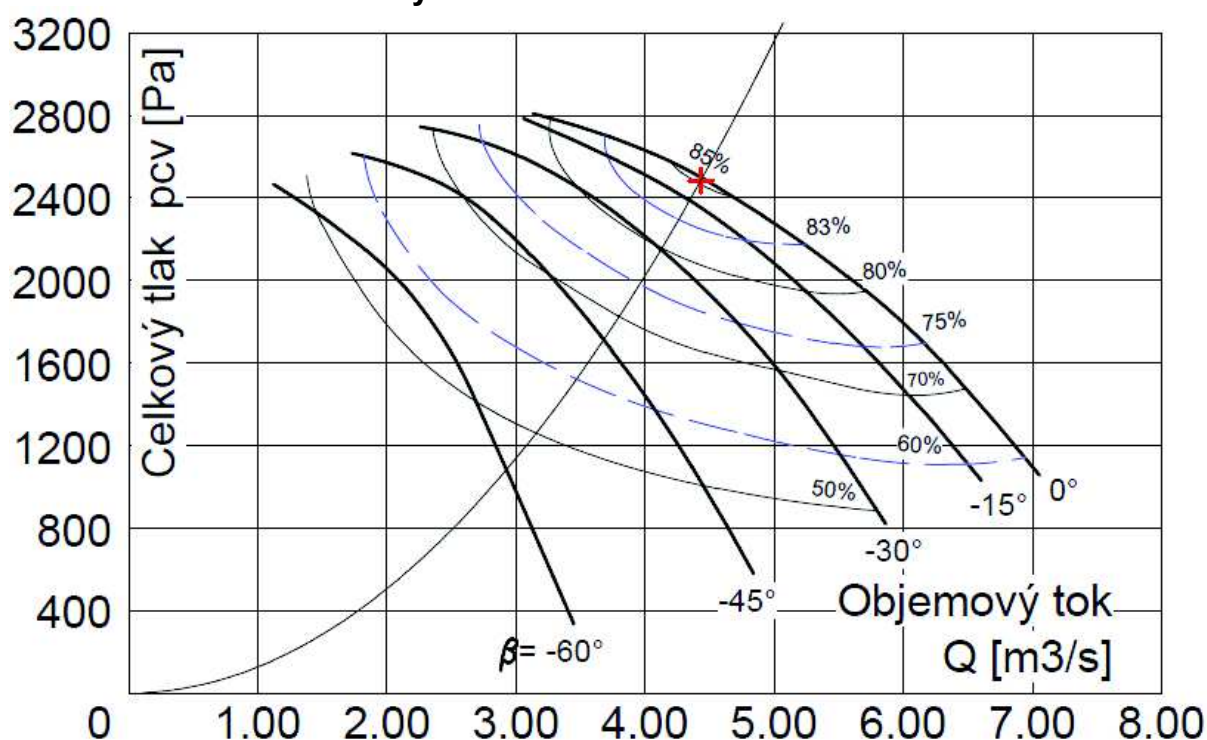
Ventilátory se kotví buď přímo na betonový základ nebo pružně přes izolátory kmitání (příslušenství).

1.3. Technická data.

12x radiální ventilátor RSB 630/630 PM 12 3217.13 RÚ
navržený pro hodnoty:

Teplota na vstupu (°C)	321
Množství Q (Nm ³ /s)	2,00
Měrná hmotnost na vstupu ρ (kg/m ³)	0,583
Množství Q (m ³ /s)	4,432
Zvýšení stat. tlaku Δp _{st} (Pa)	2340
Celkový tlak Δp _{cv} (Pa)	2483
Počet otáček (ot./min.)	2955
Účinnost (%)	85,1
Příkon (kW)	12,9

Výkonová charakteristika



Průměr [mm]	Otáčky [1/min]	Průtok [m ³ /s]	C.tlak 1) [Pa]	S.tlak [Pa]	Účinnost [%]	Výkon [kW]	Hustota [kg/m ³]
+ 630/630	2955	4.432	2483	2340	85.1	12.9	0.583



Hlučnost

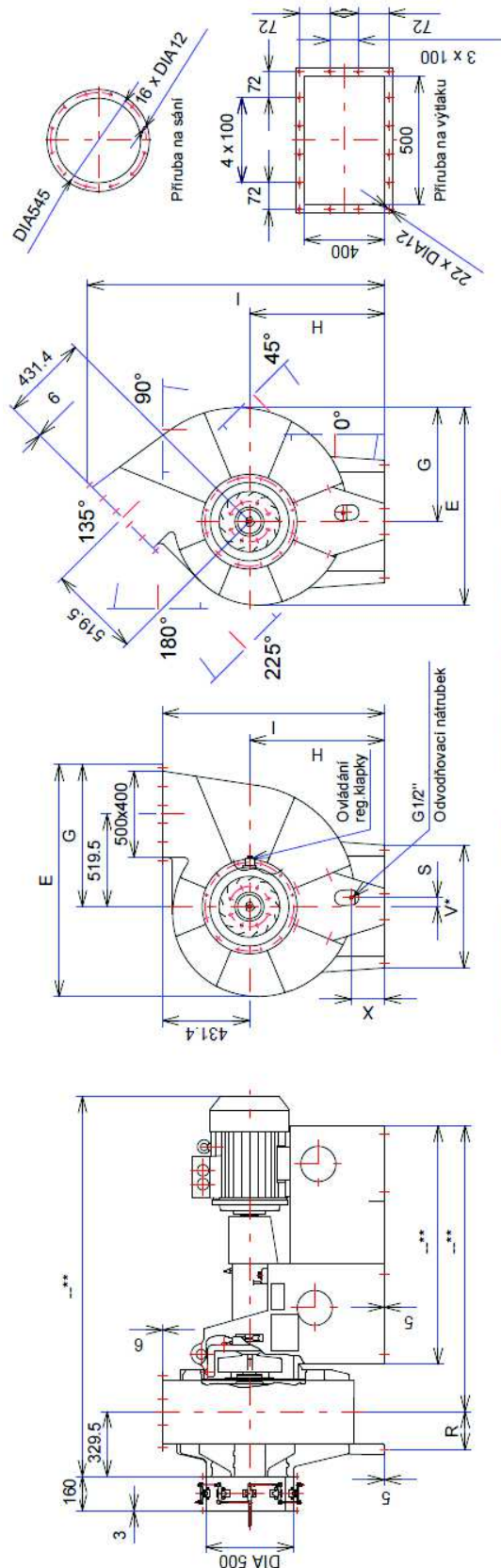
VENTILÁTOR RSB630 - hluk do okolí

VENTILÁTOR:	RVM 2240 6/1,00 oboustran	D [m]	0,63	LIMIT:	
AKCE	El. Chvaletice	n [rpm]	3000	$L_{Aeq,T(1m)}$	≤ 85 dB(A)
Nabídka č.:		f_L [Hz]	450	ρ [kg/m ³]	0,583
				z_R	9
					umístění v exteriéru

VÝPOČET

$f_m 1/3oct.$ [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	ŠÍROKOPÁSMOVÉ	
Lw IV [dB]	102	99	97	95	92	86	77	60	105 [dB]	
LwA IV [dB(A)]	76	83	88	92	92	87	78	59	97 [dB(A)]	
Lp IV [dB]	88	85	83	81	78	72	63	46	92 [dB]	
LpA IV [dBA]	62	69	75	78	78	73	64	45	83 [dB(A)]	+/-3 dB
LpA motor [dBA]									78 [dB(A)]	
Lw IV [dB]	102	99	97	95	92	86	77	60	105 [dB]	
LwA IV [dB(A)]	76	83	88	92	92	87	78	59	97 [dB(A)]	
Lp chlad. kotouč [dB]	95	92	90	88	85	79	70	53	98 [dB]	
LpA chl. kotoucí [dB(A)]	69	76	81	85	85	80	71	52	89 [dB(A)]	+/-3 dB
LpA 1m před strojem neizolovaným									91 [dB(A)]	+/-4 dB
IZOLACE: mv50 ocel 0.5										
D izolace	-7	-3	6	13	19	25	30	35		
Lp IV - D (s izolací)	95	88	77	69	59	47	33	11	96 [dB]	
LpA IV - D (s izolací)	69	72	68	65	59	48	34	10	75 [dB(A)]	+/-3 dB
LpA motor [dBA]									78 [dB(A)]	
D tlumič THKJ/800-1000-500- KM0044/96	2	4	9	27	38	37	28	19		
LpA chlad kotouče s tlumičem [dB(A)]	67	72	72	58	47	43	43	33	76 [dB(A)]	+/-3 dB
LpA IV 1m před izolovaným ventilátorem s motorem									81 [dB(A)]	+/-4 dB

Orientační rozměrový náčrt

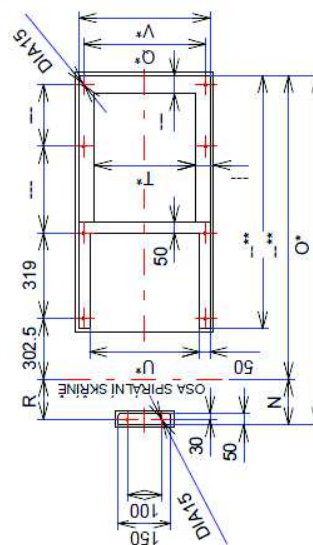


Rozměry závislé na poloze spirální skříně

Položka skříně	E	G	H	I	N	O*	Q*	R	S	T*	U*	V*	X
0°	1013	431	880	1360	249.5	--	560	229.5	--	--	500	600	--
45°	1408	877	760	1190	249.5	--	560	229.5	99.2	--	500	600	127
90°	1289	809	690	1121	249.5	--	560	229.5	63.8	--	500	600	123
135°	1078	648	690	1567	249.5	--	560	229.5	60.3	--	500	600	174.4
180°	1013	582	590	1399	249.5	--	560	229.5	70.3	--	500	600	124.8
225°	1408	531	590	1238	249.5	--	560	229.5	51.9	--	500	600	174.5

Rozměry označené * jsou závislé na velikosti elektromotoru. Bokorysy jsou bez regulační klapky s naznačenou polohou ovládání (kresleno provedení pravé). Rozměr G je stanoven vždy v horizontální rovině od středu k pravému okraji spirální skříně.

pouze rozměry nezávislé na velikosti motoru





1.4. Nátěry.

Standard pro prostředí C2 - M.

1.5. Technické garance.

Garantované mezní úchytky smluvních pracovních parametrů ventilátoru.

Q_v	$\pm 2,5\%$
Δp_{cv}	$\pm 2,5\%$

Vibrace jsou garantovány podle ČSN 12 2011 Ventilátory. Maximálně přípustné hodnoty mechanického kmitání. Garantované hodnoty mohou být splněny pouze za podmínek vhodně aerodynamicky voleného potrubí na sání a výtlaku.

1.6. Specifikace rozsahu nabídky

Pozi- ce	Položka	Počet jedin.	Hmotnost v kg	
			jednot.	celkem
1	Ventilátor RSB 630/630 PM 12 3217.13 RÚ	2	410	820
2	Elektromotor; IE3; 15 kW; 400V; 3000 ot./min.	2	110	220
3	Regulační ústrojí URV 0500	2	10	120
4	Kompenzátor 900 KM 12 0380.4	2	64	128
5	Kompenzátor 900x710 KM 12 0480.4	2	375	750
6	Spojka Eupex	2	10	20
7	Hluková izolace: MV 50 mm; 0,5 mm plech	8m ²		
8	Tlumič KTH500x200-1500	8	5	40

2. Obchodní část nabídky

2.1. Předmět nabídky.

Ventilátor s příslušenstvím dle specifikace rozsahu v technické části nabídky.

2.2. Cena dodávky

2x Ventilátor včetně příslušenství dle specifikace

618 000,- Kč

Cena se rozumí franco závod – EXW (bez DPH).

V ceně není zahrnuto: obaly, náhradní díly, spec. zkoušky, doprava.

Montáž zařízení, napojení a propojení elektročásti není součástí této nabídky.

Předpokladem při napojení těchto komponentů do systému je plná účast objednavatele.

V případě objednávky je nutné dále upřesnit nebo potvrdit, rozsah dodávky, provozní stavy a provozní podmínky, natočení ventilátorů, případně další požadavky.

2.3. Běžná dodací lhůta:

14 -16 týdnů po uzavření KS.



2.4. Specifikace jakostních parametrů dodávky a další podstatné údaje určující stanovenou cenu a dodací lhůtu:

Prohlášení o shodě podle nařízení vlády ČR č. 24/2003 Sb.

Provedení dle norem ČSN EN a PM, záruční lhůta 24 měsíců od uvedení do provozu, nejdéle však 30 měsíců od dodání. U ND 6 měsíců od dodání.

Podmínka pro poskytnutí záruky je montáž provedená odbornou firmou, kontrola montáže a účast našeho technika při uvádění do provozu.

2.5. Platnost nabídky

Do: 30. 6. 2015

2.6. Plnění.

Plnění bude provedeno dle samostatně uzavřené Kupní smlouvy. Návrh KS bude vypracován po doručení závazné objednávky zájemce, obsahující odkaz/odvolávku na číslo NABÍDKY ZVVZ MACHINERY, a. s., rekapitulaci předmětu požadovaného plnění, (u více výrobků i počet kusů), navržený/ požadovaný termín, případně místo plnění, souhlas s cenovou nabídkou /za zboží /ks/ celkem případně s dalšími podmínkami vyjádřenými v Nabídce. Objednávka zájemce potvrzená ZVVZ MACHINERY, a.s., která bude zaslána zpět budoucímu kupujícímu před doručením návrhu, popř. současně s návrhem KS je pouze jedním ze základních podkladů pro uzavření dané KS a vyjadřuje akceptaci objednávky zájemce firmou ZVVZ MACHINERY, a.s. Platební a další podmínky budou specifikovány ve smlouvě.

Tato nabídka není návrhem smlouvy.

S pozdravem

Martin Pipek

Obchodní oddělení Ventilátory

PŘÍLOHA 8: Návrh izolace kanálů

Verze programu: 3.06

Čas/datum: 18:08 05.05 2015

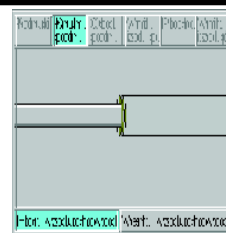
Držitel licence: Petr Dvořák, Vysoká škola báňská

Projekt: Izolace OFA vzduchů

Název zařízení: K3

Zodpovědná osoba:

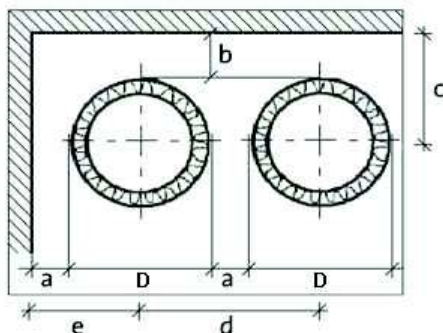
Název souboru: C:\Users\Petr\OneDrive\ŠKOLA\5. ročník\DIPLOMOVÁ PRÁCE\izolace\kruhová část 260.gcl



Výpočet tepelné ztráty	Požadovaná tl. izolace	Stand. tl. izolace
Tloušťka izolace	87.1 mm	100.0 mm
Povrchová teplota izolace	40.0 °C	37.6 °C
Tepelná ztráta	164.7 W/m	149.3 W/m
Součinitel prostupu tepla izolovaného potrubí	0.61 W/mK	0.55 W/mK
Tepelná vodivost izolace	0.054 W/mK	0.048 W/mK
Souč. přestupu tepla vně	6.0 W/m ² K	5.9 W/m ² K
Souč. přestupu tepla uvnitř	37.6 W/m ² K	37.6 W/m ² K
Vnitřní povrchová teplota na výstupu	285.1 °C	285.4 °C
Tepelná ztráta bez izolace (emisivita = 0.85)	3911.6 W/m	-
Energetická úspora po zaizolování	96 %	96 %
Souč. přestupu tepla uvnitř	37.6 W/m ² K	37.6 W/m ² K

Výpočet tepelné ztráty	Vstupní hodnoty
Typ	Kruhové potrubí
Průměr potrubí	260.0 mm
Délka potrubí	1.00 m
Kalkulační kritérium	Maximální povrchová teplota
Povrchová teplota	40.0 °C
Izolační produkt - vrstva 1	Orstech DP 100 X-X (EN 12667-měřené hodnoty) (Isover)
Vnější povrchová úprava	Pozinkovaný plech, zaprášený
Emisivita povrchu	0.44
Teplota média	290.0 °C
Okolní teplota	20.0 °C
Prostředí	Vnitřní (přirozené proudění)
Průtok	3208 m ³ /h
Neizolované potrubní závěsy	Ne

Doporučené odstupové vzdálenosti



- a: 300 mm
- b: 100 mm
- c: 330 mm
- d: 760 mm
- e: 530 mm
- D: 460 mm

Verze programu: 3.06

Čas/datum: 18:08 05.05 2015

Držitel licence: Petr Dvořák, Vysoká škola báňská

Projekt: Izolace OFA vzduchů

Název zařízení: K3

Zodpovědná osoba:

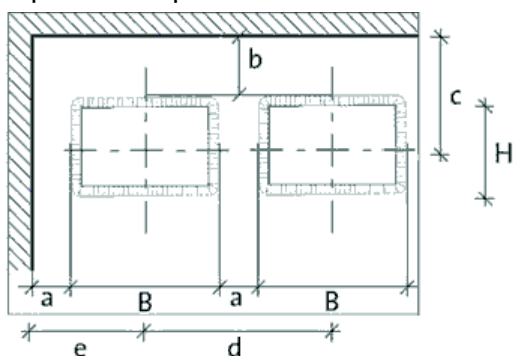
Název souboru: C:\Users\Petr\OneDrive\ŠKOLA\5. ročník\DIPLOMOVÁ PRÁCE\izolace\svislá část 400x500.gcl



Výpočet tepelné ztráty	Výsledky
Nutná tloušťka izolace	112.2 mm
Nejbližší standardní tloušťka izolace	Tlustší než max. standardní tloušťka
Tepelná ztráta	313.4 W/m
Součinitel prostupu tepla izolovaného potrubí	1.16 W/mK
Souč. přestupu tepla vně	5.8 W/m ² K
Souč. přestupu tepla uvnitř	38.5 W/m ² K
Vnitřní povrchová teplota na výstupu	277.0 °C
Tepelná vodivost izolace	0.055 W/mK
Tepelná ztráta bez izolace (emisivita = 0.85)	8692.8 W/m

Výpočet tepelné ztráty	Vstupní hodnoty
Typ	Obdélníkové potrubí, vnější izolace
Výška potrubí	400.0 mm
Šířka potrubí	500.0 mm
Délka potrubí	1.00 m
Kalkulační kritérium	Maximální povrchová teplota
Povrchová teplota	40.0 °C
Izolační produkt - vrstva 1	Isover FireProtect 150 F (EN ISO 13787-deklarované hodnoty) (Isover)
Vnější povrchová úprava	Pozinkovaný plech, zaprášený
Emisivita povrchu	0.44
Teplota média	290.0 °C
Okolní teplota	20.0 °C
Prostředí	Vnitřní (přirozené proudění)
Průtok	12830 m ³ /h
Neizolované potrubní závěsy	Ne

Doporučené odstupové vzdálenosti



- a: 500 mm
- b: 300 mm
- c: 612 mm
- d: 1224 mm
- e: 862 mm
- B: 724 mm
- H: 624 mm

Verze programu: 3.06

Čas/datum: 18:09 05.05 2015

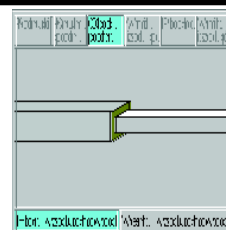
Držitel licence: Petr Dvořák, Vysoká škola báňská

Projekt: Izolace OFA vzduchů

Název zařízení: K3

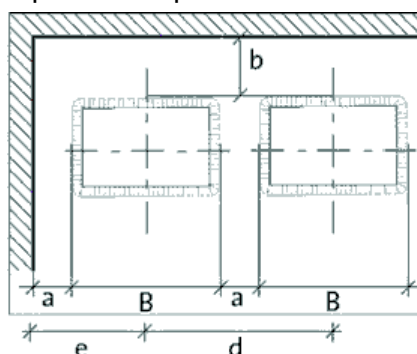
Zodpovědná osoba:

Název souboru: C:\Users\Petr\OneDrive\ŠKOLA\5. ročník\DIPLOMOVÁ PRÁCE\Izolace\vdorovná část 317x159.gcl



Výpočet tepelné ztráty	Požadovaná tl. izolace	Stand. tl. izolace
Tloušťka izolace	96.6 mm	100.0 mm
Povrchová teplota izolace	40.0 °C	39.7 °C
Tepelná ztráta	203.9 W/m	201.1 W/m
Součinitel prostupu tepla izolovaného potrubí	0.76 W/mK	0.74 W/mK
Tepelná vodivost izolace	0.053 W/mK	0.048 W/mK
Souč. přestupu tepla vně	5.9 W/m ² K	5.8 W/m ² K
Souč. přestupu tepla uvnitř	46.2 W/m ² K	46.2 W/m ² K
Vnitřní povrchová teplota na výstupu	254.3 °C	254.9 °C
Tepelná ztráta bez izolace (emisivita = 0.85)	4558.0 W/m	-
Energetická úspora po zaizolování	96 %	96 %
Souč. přestupu tepla uvnitř	46.2 W/m ² K	46.2 W/m ² K

Výpočet tepelné ztráty	Vstupní hodnoty
Typ	Obdélníkové potrubí, vnější izolace
Výška potrubí	317.0 mm
Šířka potrubí	159.0 mm
Délka potrubí	1.00 m
Kalkulační kritérium	Maximální povrchová teplota
Povrchová teplota	40.0 °C
Izolační produkt - vrstva 1	Isover FireProtect 150 F (EN ISO 13787-deklarované hodnoty) (Isover)
Vnější povrchová úprava	Pozinkovaný plech, zaprášený
Emisivita povrchu	0.44
Teplota média	290.0 °C
Okolní teplota	20.0 °C
Prostředí	Vnitřní (přirozené proudění)
Průtok	3208 m ³ /h
Neizolované potrubní závěsy	Ne

Doporučené odstupové vzdálenosti


- a: 300 mm
- b: 300 mm
- c: 558 mm
- d: 659 mm
- e: 479 mm
- B: 359 mm
- H: 517 mm

Verze programu: 3.06

Čas/datum: 18:05 05.05 2015

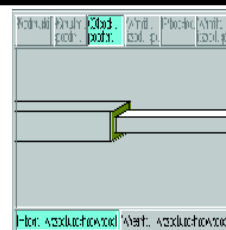
Držitel licence: Petr Dvořák, Vysoká škola báňská

Projekt: Izolace OFA vzduchů

Název zařízení: K3

Zodpovědná osoba:

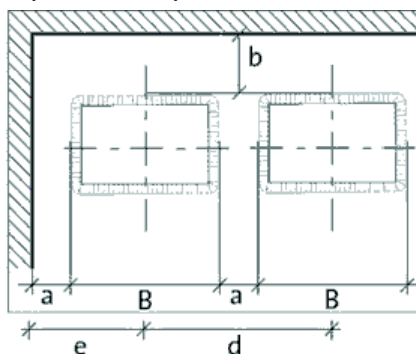
Název souboru: C:\Users\Petr\OneDrive\ŠKOLA\5. ročník\DIPLOMOVÁ PRÁCE\izolace\vdorovná část 317x317.gcl



Výpočet tepelné ztráty	Výsledky
Nutná tloušťka izolace	105.1 mm
Nejbližší standardní tloušťka izolace	Tlustší než max. standardní tloušťka
Tepelná ztráta	248.3 W/m
Součinitel prostupu tepla izolovaného potrubí	0.92 W/mK
Souč. přestupu tepla vně	5.9 W/m ² K
Souč. přestupu tepla uvnitř	41.9 W/m ² K
Vnitřní povrchová teplota na výstupu	267.9 °C
Tepelná vodivost izolace	0.055 W/mK
Tepelná ztráta bez izolace (emisivita = 0.85)	6047.3 W/m

Výpočet tepelné ztráty	Vstupní hodnoty
Typ	Obdélníkové potrubí, vnější izolace
Výška potrubí	317.0 mm
Šířka potrubí	317.0 mm
Délka potrubí	1.00 m
Kalkulační kritérium	Maximální povrchová teplota
Povrchová teplota	40.0 °C
Izolační produkt - vrstva 1	Isover FireProtect 150 F (EN ISO 13787-deklarované hodnoty) (Isover)
Vnější povrchová úprava	Pozinkovaný plech, zaprášený
Emisivita povrchu	0.44
Teplota média	290.0 °C
Okolní teplota	20.0 °C
Prostředí	Vnitřní (přirozené proudění)
Průtok	6415 m ³ /h
Neizolované potrubní závěsy	Ne

Doporučené odstupové vzdálenosti



- a: 300 mm
- b: 300 mm
- c: 563 mm
- d: 827 mm
- e: 563 mm
- B: 527 mm
- H: 527 mm

Verze programu: 3.06

Čas/datum: 18:10 05.05 2015

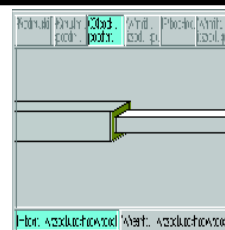
Držitel licence: Petr Dvořák, Vysoká škola báňská

Projekt: Izolace OFA vzduchů

Název zařízení: K3

Zodpovědná osoba:

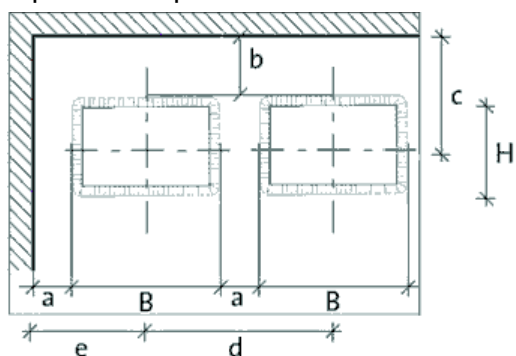
Název souboru: C:\Users\Petr\OneDrive\ŠKOLA\5. ročník\DIPLOMOVÁ PRÁCE\izolace\vdorovná část 388x388.gcl



Výpočet tepelné ztráty	Výsledky
Nutná tloušťka izolace	110.9 mm
Nejbližší standardní tloušťka izolace	Tlustší než max. standardní tloušťka
Tepelná ztráta	281.7 W/m
Součinitel prostupu tepla izolovaného potrubí	1.04 W/mK
Souč. přestupu tepla vně	5.8 W/m ² K
Souč. přestupu tepla uvnitř	39.8 W/m ² K
Vnitřní povrchová teplota na výstupu	273.9 °C
Tepelná vodivost izolace	0.055 W/mK
Tepelná ztráta bez izolace (emisivita = 0.85)	7318.4 W/m

Výpočet tepelné ztráty	Vstupní hodnoty
Typ	Obdélníkové potrubí, vnější izolace
Výška potrubí	388.0 mm
Šířka potrubí	388.0 mm
Délka potrubí	1.00 m
Kalkulační kritérium	Maximální povrchová teplota
Povrchová teplota	40.0 °C
Izolační produkt - vrstva 1	Isover FireProtect 150 F (EN ISO 13787-deklarované hodnoty) (Isover)
Vnější povrchová úprava	Pozinkovaný plech, zaprášený
Emisivita povrchu	0.44
Teplota média	290.0 °C
Okolní teplota	20.0 °C
Prostředí	Vnitřní (přirozené proudění)
Průtok	9623 m ³ /h
Neizolované potrubní závěsy	Ne

Doporučené odstupové vzdálenosti



- a: 300 mm
- b: 300 mm
- c: 605 mm
- d: 910 mm
- e: 605 mm
- B: 610 mm
- H: 610 mm

Verze programu: 3.06

Čas/datum: 18:10 05.05 2015

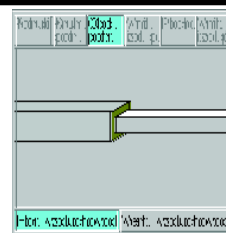
Držitel licence: Petr Dvořák, Vysoká škola báňská

Projekt: Izolace OFA vzduchů

Název zařízení: K3

Zodpovědná osoba:

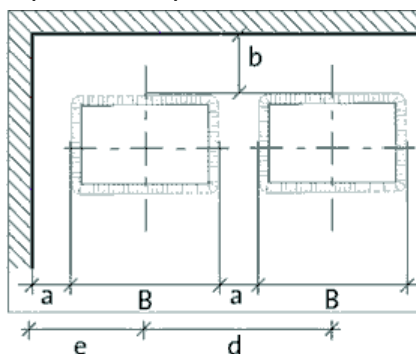
Název souboru: C:\Users\Petr\OneDrive\ŠKOLA\5. ročník\DIPLOMOVÁ PRÁCE\izolace\vdorovná část 400x500.gcl



Výpočet tepelné ztráty	Výsledky
Nutná tloušťka izolace	115.7 mm
Nejbližší standardní tloušťka izolace	Tlustší než max. standardní tloušťka
Tepelná ztráta	307.6 W/m
Součinitel prostupu tepla izolovaného potrubí	1.14 W/mK
Souč. přestupu tepla vně	5.6 W/m ² K
Souč. přestupu tepla uvnitř	38.6 W/m ² K
Vnitřní povrchová teplota na výstupu	277.4 °C
Tepelná vodivost izolace	0.055 W/mK
Tepelná ztráta bez izolace (emisivita = 0.85)	8421.1 W/m

Výpočet tepelné ztráty	Vstupní hodnoty
Typ	Obdélníkové potrubí, vnější izolace
Výška potrubí	400.0 mm
Šířka potrubí	500.0 mm
Délka potrubí	1.00 m
Kalkulační kritérium	Maximální povrchová teplota
Povrchová teplota	40.0 °C
Izolační produkt - vrstva 1	Isover FireProtect 150 F (EN ISO 13787-deklarované hodnoty) (Isover)
Vnější povrchová úprava	Pozinkovaný plech, zaprášený
Emisivita povrchu	0.44
Teplota média	290.0 °C
Okolní teplota	20.0 °C
Prostředí	Vnitřní (přirozené proudění)
Průtok	12830 m ³ /h
Neizolované potrubní závěsy	Ne

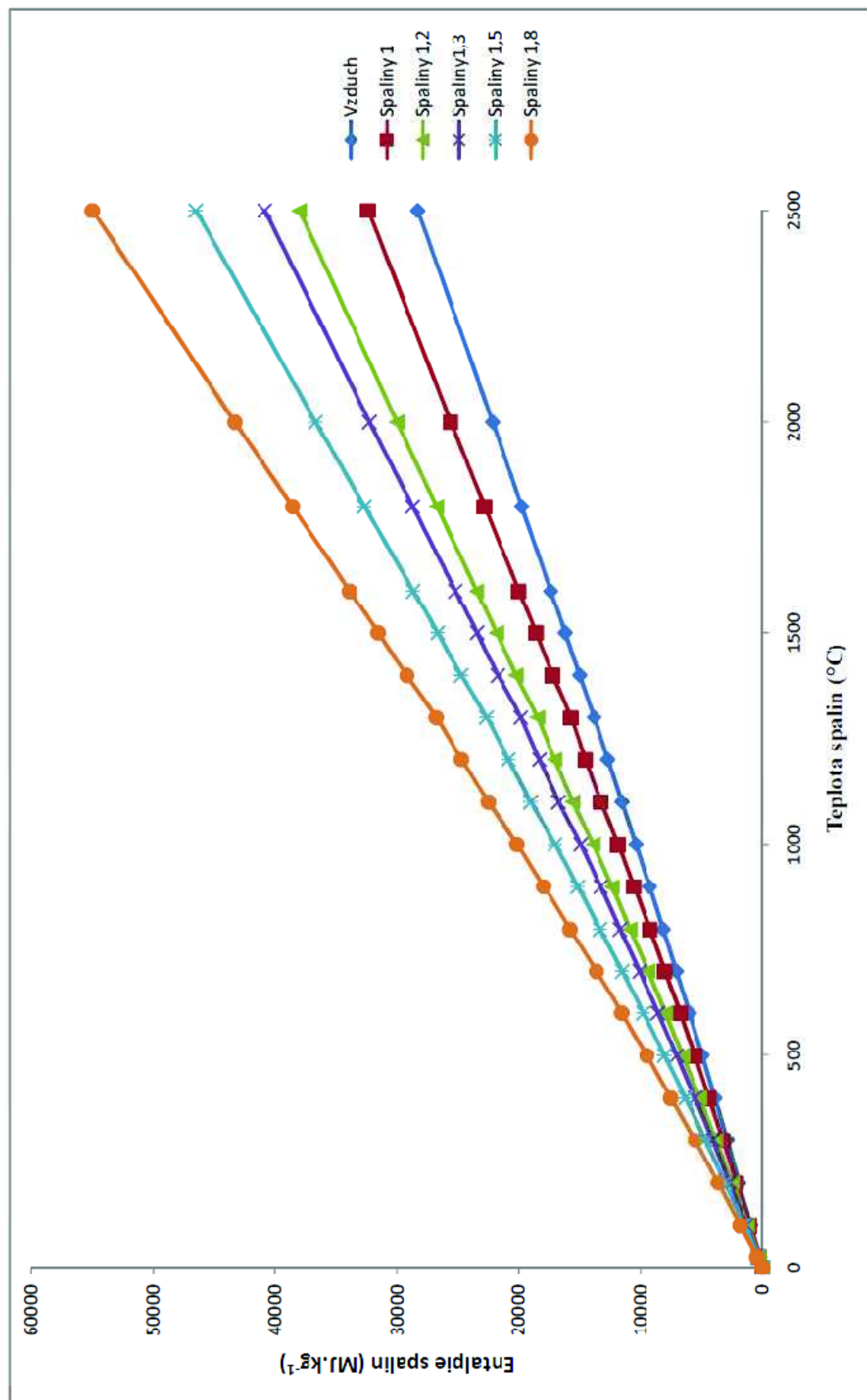
Doporučené odstupové vzdálenosti



- a: 500 mm
- b: 300 mm
- c: 615 mm
- d: 1231 mm
- e: 865 mm
- B: 731 mm
- H: 631 mm

PŘÍLOHA 9: Graf a tabulka I-t spalin

			$I_s^{t,\alpha}$				
t	I_{smin}	I_{vmin}	1	1,2	1,3	1,5	1,8
°C	kJ.kg^{-1}	kJ.kg^{-1}	kJ.kg^{-1}	kJ.kg^{-1}	kJ.kg^{-1}	kJ.kg^{-1}	kJ.kg^{-1}
0	0	0	0	0	0	0	0
25	262,59	235,23	262,59	309,64	333,16	380,21	450,78
100	1050,17	954,51	1050,17	1241,08	1336,53	1527,43	1813,78
200	2125,68	1920,81	2125,68	2509,85	2701,93	3086,09	3662,33
300	3235,53	2904,69	3235,53	3816,47	4106,94	4687,88	5559,28
400	4378,97	3909,57	4378,97	5160,88	5551,84	6333,75	7506,63
500	5559,57	4937,81	5559,57	6547,13	7040,91	8028,48	9509,82
600	6750,97	5988,58	6750,97	7948,69	8547,55	9745,26	11541,84
700	7986,63	7061,29	7986,63	9398,88	10105,01	11517,27	13635,66
800	9244,63	8151,57	9244,63	10874,95	11690,11	13320,42	15765,89
900	10523,41	9264,62	10523,41	12376,33	13302,79	15155,72	17935,10
1000	11823,43	10392,40	11823,43	13901,91	14941,15	17019,63	20137,35
1100	13247,06	11534,92	13247,06	15554,05	16707,54	19014,52	22475,00
1200	14519,19	12686,62	14519,19	17056,51	18325,17	20862,49	24668,48
1300	15707,94	13820,70	15707,94	18472,08	19854,15	22618,29	26764,50
1400	17196,42	15008,18	17196,42	20198,05	21698,87	24700,51	29202,96
1500	18577,19	16188,18	18577,19	21814,83	23433,65	26671,28	31527,73
1600	19990,01	17368,51	19990,01	23463,71	25200,56	28674,26	33884,81
1800	22780,41	19751,57	22780,41	26730,73	28705,89	32656,20	38581,67
2000	25579,15	22164,34	25579,15	30012,02	32228,45	36661,32	43310,62
2500	32346,09	28281,83	32346,09	38002,46	40830,64	46487,01	54971,55



PŘÍLOHA 10: Fotografie z měření ze dne 28.3.2015



Odběr vzorků plynů ze spalovací komory



Odběr vzorku plynu do vaku



Analyzátor NO_x, CO a O₂